

## 대형진동삼축시험기를 이용한 암석재료의 동적변형특성에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on Dynamic Deformation Properties of Rock Materials using Large Triaxial Testing Apparatus

신 동훈<sup>1)</sup>, Dong-Hoon Shin

1) 한국수자원공사 수자원연구소 댐안전연구실 책임연구원, Chief Researcher, Dam Safety Research Center of WRI, KOWACO

**SYNOPSIS** : In order to investigate the dynamic deformation properties of rockfill materials in small strain level, cyclic triaxial tests were conducted using the large cyclic triaxial testing apparatus, which was developed by Water Resources Research Institute of KOWACO in 2001. Two types of rockfill materials consisting of granite and shale-sandstone were tested in this study. The test results show that  $G/G_{max}$  of granite specimen decreases more than that of shale-sandstone with the increase of shear strain and the increase ratio in the maximum shear modulus  $G_{max}$  of granite is bigger than the ratio of shale-sandstone.

**Key words** : Dynamic deformation properties, small strain, large cyclic triaxial test, rockfill

### 1. 서론

지반구조물의 지진해석시 필요한 토질재료의 저변형율 영역에서의 동적변형특성(Dynamic Deformation Properties)은 일반적으로 진동삼축시험기, 공진/비틀전단시험기 등을 사용하여 구하고 있다. 일반적인 진동삼축시험기의 경우 공진/비틀전단시험기 보다 측정할 수 있는 변형율의 범위가 넓지 않은 문제점이 있으나  $10^{-5}$ 이하의 축변위를 측정할 수 있는 시스템을 구축하여 시험하면 충분히 넓은 변형율 영역에서의 동적변형특성 평가가 가능하다.

한편, 지반재료 중 점성토나 사질토에 대한 동적강도(또는 액상화 강도)나 동적변형특성에 대한 이론적 및 실험적 연구는 비교적 활발하게 이루어져 왔으나 Rockfill재료나 자연 사력재료와 같은 조립재료에 대해서는 (국내의 경우) 연구가 미흡한 실정이다. 다만, 최근 현장을 중심으로 크로스홀시험, 다운홀시험, SASW시험 등에 의한 동적물성치 산정에 관한 연구와 실무에의 적용이 활발하게 이루어지고 있는 것으로 보인다. 토목공사시 접하게 되는 지반재료의 많은 부분이 2mm 이상의 조립의 입상재료이고, 댐 또는 항만시설 공사에 사용되는 재료가 30~1500mm의 큰 입자들임을 감안하면, 향후 이러한 재료들의 동적변형특성 등에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다.

본 연구에서는 댐 축조용 암석재료(Rockfill)의 동적변형특성을 파악하기 위하여  $10^{-5}$ 이하의 저변형율 측정이 가능하도록 기존의 대형진동삼축시험기(신동훈, 2000)에 미소변위 측정시스템(Small Strain Measurement System)을 추가하였으며, 화강암 및 혈암-사암 등의 암석재료에 대한 반복재하 대형삼축시험을 수행하여 그 재료들의 동적변형특성을 검토하였다.

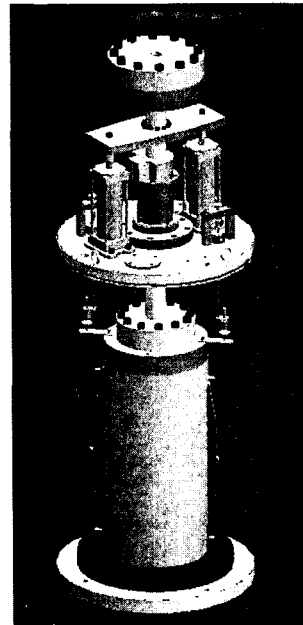
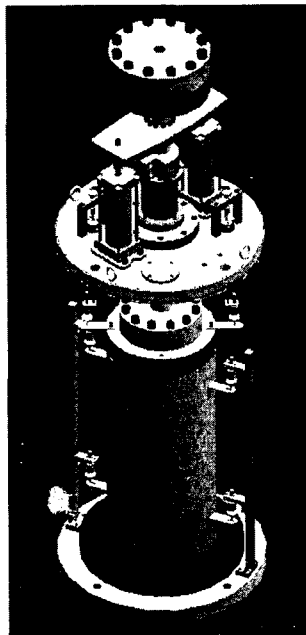
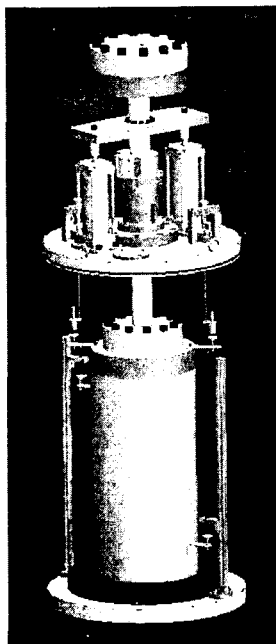
### 2. 시험장비

본 연구에서 사용한 대형진동삼축시험기는 표-1과 같고, 저변형율 영역의 축변위를 정밀하게 측정하

기 위하여 그림-1과 같이 Gap Sensor, LVDT 및 LDT 등의 고정밀 센서를 사용할 수 있도록 하였다. 데이터의 취득은 National Instrument사의 SCXI Module을 이용한 Data Logging System과 데이터 획득 및 정리용 프로그램인 CyclicTest Ver.1.0을 사용하여 이루어졌다.

표-1 대형진동삼축시험기의 주요 제원 (수자원연구소, 2002)

|         |        | 주요 제원  |
|---------|--------|--|
| 적용시험    |        | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 정적시험(UU, CU, CU' 및 CD)</li> <li>■ 동적시험 (반복재하시험, 액상화시험)</li> </ul>   |
| 공시체의 크기 |        | ■ 직경 300mm×높이 620mm  |
| 동적시험    | 타입     | ■ 전기유압서보방식   |
|         | 용량     | ■ 500 kN   |
|         | 사용주파수  | ■ 0.01~100 Hz  |
|         | 사용파형   | ■ Sine파 외 3개 파형  |
|         | 제어방식   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 응력제어법</li> <li>■ 변위제어법</li> </ul>   |
|         | 측변위 센서 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Internal Measuring 또는 Local Measuring                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gap Sensor</li> <li>- LVDT</li> <li>- LDT(Local Deformation Transducer)</li> </ul> </li> <li>■ External Measuring                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Displacement Transducer(25mm, 100mm)</li> </ul> </li> </ul> |
| 정적시험    | 타입     | ■ 전기유압서보 방식  |
|         | 용량     | ■ 750 kN   |
|         | 변위 속도  | ■ 0.01~60 mm/min.  |
| 구속압     | 형식     | ■ 공압제어 수압변환방식  |
|         | 용량     | ■ 2Mpa (20kgf/cm <sup>2</sup> )  |
| 공시체 제작법 |        | ■ 충격다짐에 의한 자동다짐  |



(a) Gap Sensor+LVDT      (b) Gap Sensor+Gap Sensor      (c) Gap Sensor+LDT

그림-1 미소변위 측정을 위한 센서설치 개념도

### 3. 시험재료

#### 3.1 물리적 성질 및 입도분포

본 연구에서 사용한 시험재료는 화강암(granite) 및 혈암-사암(shale & sandstone) 등 2종류로서 물리적 성질은 표-2와 같고 입도분포는 그림-2와 같다. 입자의 최대입경은 50.8mm이다.

표-2 시험재료의 물리적 성질

| 암종                           | 시험값       |          | 비고 |
|------------------------------|-----------|----------|----|
|                              | 화강암       | 혈암 및 사암  |    |
| 비중                           | 2.681     | 2.605    |    |
| 흡수율(%)                       | 0.40      | 1.1      |    |
| 마모율(%)                       | 16.3      | 18.7     |    |
| 안정성(%)                       | 1.5       | 1.0~3.0  |    |
| 일축압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 1070~1546 | 760~1210 |    |
| NO.200체 통과율(%)               | 4.9       | 0.5      |    |
| 균등계수 C <sub>u</sub>          | 31.56     | 49.13    |    |
| 곡률계수 C <sub>g</sub>          | 1.27      | 3.58     |    |
| 통일분류                         | GW        | GP       |    |

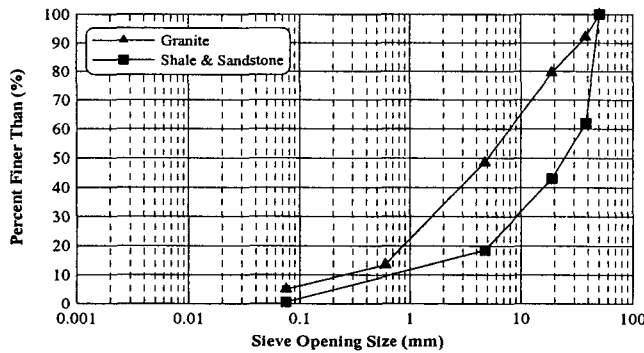


그림-2 시험재료의 입도분포곡선

#### 3.2 정적 응력-변형률 관계

그림-3과 그림-4는 화강암 및 혈암-사암 시료에 대하여 배수전단강도 시험을 실시하여 구한 응력-변형률 관계곡선으로서 편마암 시료와 혈암-사암 시료는 peak강도가 불분명하고 전단시 체적이 감소하지만, 화강암 시료는 peak강도가 분명하며 축변형률이 약 4~5%를 초과하면 체적이 팽창하는 다이러턴시 현상이 일어나는 특징을 나타내고 있다.

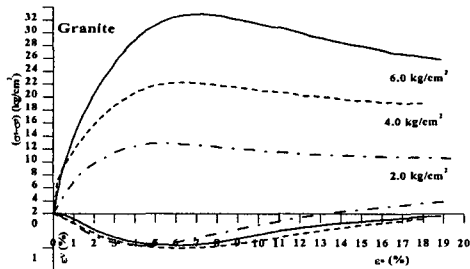


그림-3 화강암 시료의 응력-변형률 관계

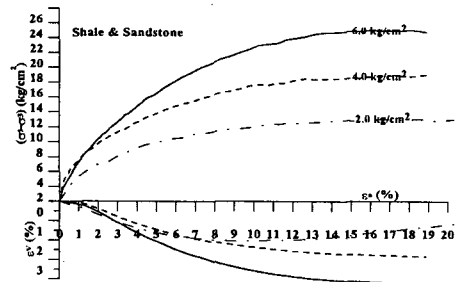


그림-4 혈암 및 사암 시료의 응력-변형률 관계

### 3.3 정적 강도특성

본 연구에 사용된 편마암, 화강암 및 혈암-사암 시료의 압밀배수 전단강도정수는 표-3과 같다.

표-3 본 연구에 사용된 시료의 압밀배수 전단강도정수

|          | 점착력 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 내부마찰각 (°) | 비 고 |
|----------|---------------------------|-----------|-----|
| 화강암 시료   | 0.47                      | 44.5      |     |
| 혈암-사암 시료 | 1.20                      | 36.9      |     |

## 4. 반복재하 삼축시험방법

### 4.1 시험계획

본 연구에서 반복재하시험은 국내의 관련기준이 없는 관계로 ASTM D3991-91(1996) 및 JGS 0542-2000을 참고하였다. 반복재하방법은 하중제어(load control)방법을 적용하였으며, 정적 압밀배수시험과 마찬가지로 3개의 구속압력(2.0, 4.0 및 6.0kg/cm<sup>2</sup>)에 대하여 각각 별개의 공시체를 작성하여 시험하는 것으로 하였다. 반복하중을 가하는 동안에는 배수밸브를 닫아 비배수 조건으로 시험하였다. 반복재하 중 공시체에 발생하는 변위는 공시체의 Cap에 Gap Sensor를 설치하여 측정하였으며, 10<sup>-6</sup>~10<sup>-2</sup> order까지 전단변형율이 발생하도록 재하중의 크기 및 단계를 조절하였다. 시험에 사용된 시료의 최대입경은 50.8mm이었으며, 반복재하 주파수는 0.2Hz, 반복재하시 데이터의 샘플링 주파수는 30Hz로서 충분한 데이터가 얻어지도록 하였으며, 시험CASE는 표-4와 같다.

표-4 반복재하삼축시험 CASE

| 시료명     | 화강암  | 혈암-사암                  | 비고 |
|---------|--|------------------------|----|
| 다짐조건    | 낙하고=50cm, 다짐회수=54회, 다짐층수=5층  |                        |    |
| 공시체 크기  | 직경300mm×높이620mm  |                        |    |
| 최대입경    | 50.8mm   |                        |    |
| 측압      | ▶ 편마암 : 1.0kg/cm <sup>2</sup> , 3.0kg/cm <sup>2</sup> , 및 5.0kg/cm <sup>2</sup><br>▶ 화강암 및 혈암-사암 : 2.0kg/cm <sup>2</sup> , 4.0kg/cm <sup>2</sup> , 및 6.0kg/cm <sup>2</sup> |                        |    |
| 포화/불포화  | 불포화  | 불포화                    |    |
| 함수비조정   | 기건   | 기건                     |    |
| 시료의 밀도  | 2.152 t/m <sup>3</sup>   | 2.030 t/m <sup>3</sup> |    |
| 초기간극비   | 0.246  | 0.283                  |    |
| 주응력비    |  |                        |    |
| 재하과형    | sine파  |                        |    |
| 재하 주파수  | 0.2Hz  |                        |    |
| 재하과수    | 11회  |                        |    |
| 샘플링 주파수 | 30Hz (150 points/cycle)  |                        |    |
| 배수조건    | 비배수  |                        |    |
| 측변위측정   | 꺽상부 : Gap Sensor, 공시체 : LVDT   |                        |    |

### 4.2 시험방법

- (1) 다짐시험 (정적 삼축시험과 동일)
- (2) 다짐시험결과로부터 소정의 밀도를 갖는 공시체를 제작
- (3) 제작한 공시체(몰드에 넣은 것)를 반복재하삼축시험기에 설치
  - ① 장치에 공시체에 Cap을 올려놓고 미리 접어두었던 멤브레인을 펼쳐서 Cap을 덮고 그 위에 고무 튜브를 감는다.
  - ② 공시체를 자립시키기 위하여 공시체에 약 -0.2kg/cm<sup>2</sup>의 진공압을 가한다.

- ③ 몰드를 해체, 제거한다.
- ④ 페데스탈을 고정한다.
- (4) 미소변위계를 설치
  - ① 공시체Cap에 미소변위계(Gap Sensor) 2개를 대각선 상에 대칭으로 설치한다.
  - ② 공시체에는 국부변위 측정용 미소변위계(Gap Sensor 또는 Proximeter)를 타겟과 함께 설치한 후 데이터 로깅 시스템과 연결하여 전기적 신호가 정상적으로 들어오는지 확인한다.
  - ③ Gap Sensor 및 LVDT 등의 0점을 조정해둔 후 데이터 로깅 시스템으로부터 연결 코드를 떼어내어 상반 위에 올려 놓는다.

표-5 미소변위계의 설치 위치

| 변 위 계         | 설 치 위 치   |
|---------------|---|
| Gap Sensor    | -상부 켈 2개소(좌우 대칭)<br>-타겟과 Gap Sensor의 사이가 약2.0mm가 되도록 설치<br>-미동나사로 Gap을 조절하고, 압밀 후 재확인 |
| LVDT          | -공시체의 상부와 하부 2개소<br>-공시체 상단부로부터 50mm 아래, 공시체의 하단부로부터 50mm상부에 타겟 설치                    |
| Gap Sensor변환기 | SCXI virtual Instrument 화면상에서 출력값을 확인   |

- (5) 챔버를 씌운다.
- (6) 챔버 내에 물을 주수한다.
- (7) 미소변위계의 신호 케이블을 앰프에 접속한다.
- (8) 지정된 축압으로 압밀을 행한다.
- (9) 미소변위계의 "0점 조정"을 행한다.
- (10) 피스톤과 로드셀을 접속한다.
- (11) 다시 미소변위계의 0점을 조정한다.
- (12) 반복재하
  - ① 반복재하 응력을 서서히 크게 하면서 각 재하 스테이지에서 11회의 반복재하를 가한다.(반복 재하응력, 각 미소변위계, 간극수압(필요시)의 측정상황을 컴퓨터화면에서 확인하면서 재하한다.
  - ② 이때 각 재하 단계별로 누적변위량을 기록하여 둔다.

### 4.3 데이터 정리방법

(1) 등가전단탄성계수와 감쇠정수의 산출

편진폭축응력과 편진폭 축변형율로부터 등가탄성계수를 구하고, Poisson비(가정치 또는 축방향변위 측정시 측정치 사용)를 사용하여 등가전단탄성계수를 산출한다.

$$\text{편진폭축응력} : \sigma_d = \frac{P_C + P_E}{2A_i} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (1)$$

$$\text{편진폭축변형율} : \epsilon_{a(SA)} = \frac{\Delta L}{2H_i} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

$$\text{등가탄성계수} : E_{eq} = \frac{\sigma_d}{\epsilon_{a(SA)}} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (3)$$

$$\text{등가전단탄성계수} : G_{eq} = \frac{E_{eq}}{2(1 + \nu)} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (4)$$

$$\text{편진폭전단변형율} : \gamma = (1 + \nu) \times \epsilon_{a(SA)} \quad (5)$$

$$\text{이력감쇠정수} : h = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \times 100 (\%) \quad (6)$$

여기서,  $P_C$  및  $P_E$  : 그 반복 사이클의 압축측 및 인장측 반복축하중편진폭

$A_i$  : 그 반복재하단계 개시시의 공시체의 단면적

$\Delta L$  : 그 반복사이클에서의 공시체의 축변위  $\Delta H$ 의 양진폭(cm)

$H_i$  : 그 반복재하 개시시의 공시체의 높이(cm)

$\nu$  : Poisson비

$\Delta W$  : 그 반복재하 사이클에서의 감쇠에너지에서 축하중  $P$ 와 공시체의 축변위  $\Delta H$ 가 만드는 이력곡선의 면적(손실에너지)

$W$  : 그 반복재하 사이클에서의 등가탄성에너지 (최대응답시 축적되는 변형률 에너지)

$$W = \frac{(P_C + P_E) \cdot \Delta L}{4} \quad (7)$$

(2) 미소변형률 레벨에서의 최대등가전단탄성계수  $G_{\max}$  와 최대감쇠율  $h_{\max}$

최대등가전단탄성계수  $G_{\max}$  는 각 재하단계별로 구한 등가전단탄성계수의 역수  $1/G_{eq}$  와 그에 해당하는 전단변형률  $\gamma$  를 각각 세로축과 가로축상에 도시하고, 선형회귀분석법에 의한 curve fitting을 통해 계산한  $1/G_{eq}$  의 절편값을 구하여 역수를 취함으로써 구할 수 있다.

최대이력감쇠율  $h_{\max}$  은 각 반복재하단계에서 구한 이력감쇠율  $h$  과 등가전단탄성계수  $G_{eq}$  의 관계를 도시하고 선형회귀분석으로 구한 직선의 y축 절편값이다.

(3) 등가전단탄성계수의 정규화

등가전단탄성계수  $G_{eq}$  및 감쇠정수와 전단변형률  $\gamma$  과의 관계를 도시할 때에는  $G_{\max}$  를 사용하여  $G_{eq}$  를 정규화 한다. 이러한 이유는 원위치에서의 등가전단탄성계수  $G_{\max F} (= \rho V_s^2, V_s : \text{원위치에서의 전단탄성파속도})$  와 실내시험에서 얻은  $G_{\max L} (\gamma = 10^{-6} \sim 10^{-5})$  가 시료의 교란 등 여러 가지 원인으로 달라지기 때문이다. 해석에 사용하는 각 변형률 레벨에서의  $G$  는 실내시험에서 얻어진  $G_{eq}/G_{\max L}$  에 원위치의  $G_{\max F}$  를 곱하여 얻어진다. 한편, 본 연구에서는 Hardin-Drnevich의 비선형 모델(이하 H-D모델)을 사용하여 등가전단탄성계수 및 감쇠정수의 정규화를 시도하여 각 시험재료의 동적변형특성을 비교분석하였다. 기준변형률은 곡선을 결정하는 파라메타로서 대개  $1 \times 10^{-4}$  부근의 변형률 영역에서의 정규화한 전단탄성계수를 적용하고 있다.

$$\frac{G_{eq}}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (8)$$

$$h = h_{\max} \left( 1 - \frac{G_{eq}}{G_{\max}} \right) \quad (9)$$

여기서,  $\gamma_r$  : 기준전단변형률

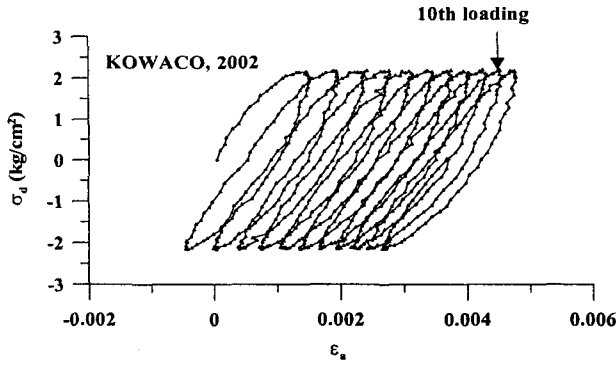


그림-5 반복재하삼축시험 결과 예

그림-6 감쇠정수의 산정방법

### 5. 반복재하 삼축시험 결과

각 재하 단계별로 전단변형율( $\gamma$ ) - 편진폭응력( $\sigma_d$ ) 이력곡선의 기울기(전단탄성계수)와 에너지 소산 정도에 따른 감쇠정수를 식(1)~(7)을 사용하여 산정하고, 각 구속응력에 대한 전단변형율-전단탄성계수 관계와 전단변형율-감쇠정수의 관계를 도시하여 반복재하시험 결과를 정리하였으며, 그림-7은 반복재하시 재하시간별 축하중 및 축변위의 측정결과의 예이다.

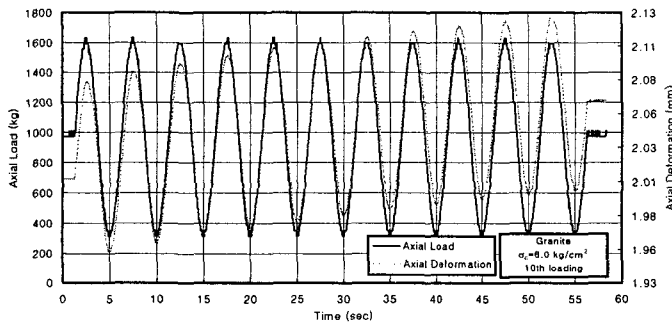


그림-7 반복재하시 축하중 및 축변위의 시간변화

#### 5.1 확장압 시료의 반복재하시험 결과

구속압 2.0, 4.0 및 6.0 kg/cm<sup>2</sup>에 대하여 15~20단계의 반복재하시험결과 확장압 시료는 그림-8과 표-6에 나타낸 바와 같이 전단변형율  $\gamma = 3.8 \times 10^{-5} \sim 4.3 \times 10^{-5}$ (내부변위계로 측정된 값)의 범위에서 최대 전단탄성계수  $G_{max}$ 는 2631.6~8064.5 kg/cm<sup>2</sup>, 최대감쇠정수  $h_{max}$ 는 21.6~30.8%의 범위로 나타났으며, 구속압이 증가할수록 전단탄성계수는 증가하는 것으로 나타났다. (최대전단탄성계수 산정시 Poisson비는 0.33을 적용) 한편, 구속압이 2.0kg/cm<sup>2</sup>로 낮은 경우에는 4.0 및 6.0kg/cm<sup>2</sup>의 경우 보다 최대전단탄성계수는 크게 낮으며, 전단변형율 증가에도 불구하고 상대적으로 적게 감소하는 경향을 나타내었다.

표-6 확장압 시료의 동적물성치 산정결과

| 구속압<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 측정된 전단변형율의범위                                 | 최대전단탄성계수 $G_{max}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 최대감쇠정수 $h_{max}$<br>(%) | 비 고 |
|------------------------------|--|---|-------------------------|-----|
| 2.0                          | $4.1 \times 10^{-5} \sim 4.2 \times 10^{-3}$ | 2631.6                                      | 21.6                    |     |
| 4.0                          | $3.8 \times 10^{-5} \sim 8.7 \times 10^{-3}$ | 6578.9                                      | 30.8                    |     |
| 6.0                          | $4.3 \times 10^{-5} \sim 7.2 \times 10^{-3}$ | 8064.5                                      | 27.4                    |     |

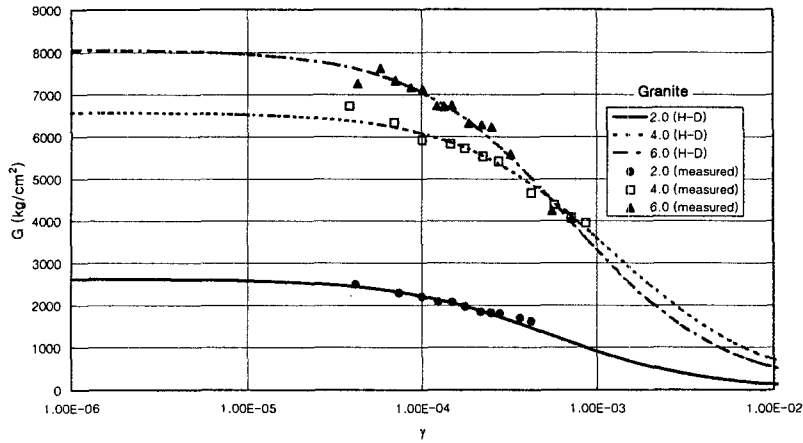


그림-8 화강암 시료의  $G \sim \log \gamma$  관계

## 5.2 혈암-사암 시료의 반복재하시험 결과

혈암-사암 시료의 구속압 2.0, 4.0 및 6.0 kg/cm<sup>2</sup>에 대한 15~20단계의 반복재하시험결과는 그림-9와 표-7에 나타낸 바와 같이 전단변형률  $\gamma = 2.6 \times 10^{-5} \sim 3.6 \times 10^{-5}$  (내부변위계로 측정된 값)의 범위에서 최대전단탄성계수  $G_{\max}$  는 6250.0~9090.9kg/cm<sup>2</sup>, 최대감쇠정수  $h_{\max}$  는 16.8~25.4%의 범위로 나타났으며, 구속압이 증가할수록 전단탄성계수는 증가하는 것으로 나타났다. 최대전단탄성계수 산정시 Poisson 비는 0.35를 적용하였다.

표-7 혈암-사암 시료의 동적물성치 산정결과

| 구속압<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 측정된 전단변형률의 범위                                | 최대전단탄성계수 $G_{\max}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 최대감쇠정수 $h_{\max}$<br>(%) | 비고 |
|------------------------------|--|--|--------------------------|----|
| 2.0                          | $3.6 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ | 6250.0                                       | 16.8                     |    |
| 4.0                          | $2.6 \times 10^{-5} \sim 1.7 \times 10^{-3}$ | 7142.9                                       | 21.4                     |    |
| 6.0                          | $2.7 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-3}$ | 9090.9                                       | 25.4                     |    |

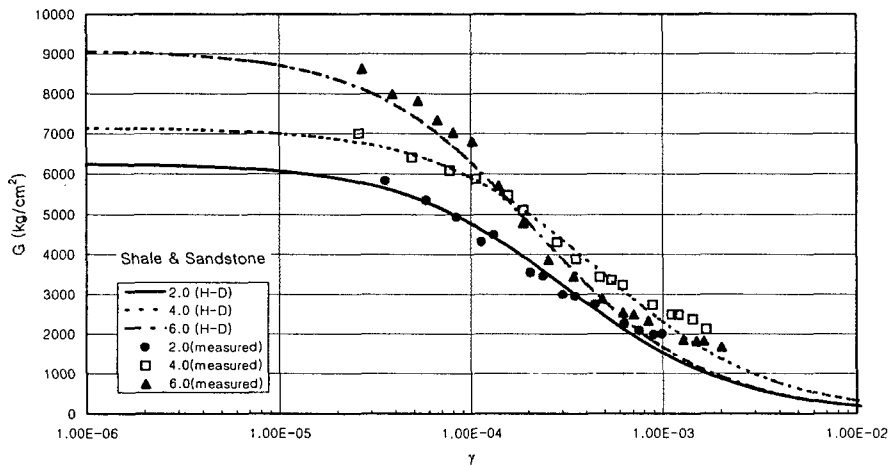


그림-9 혈암-사암 시료의  $G \sim \log \gamma$  관계



## 6. 고찰

### 6.1 전단탄성계수의 정규화

그림-10과 그림-11은 각각 화강암 및 혈암-사암 시료의 전단탄성계수의 정규화 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 화강암 시료는  $G/G_{max}$  값이  $\gamma=10^{-4}$  부근에서 불과 10%정도 감소되나 혈암-사암 시료의 경우에는 약 20%가 감소되고,  $\gamma=10^{-3}$  부근에서는 각각 55%와 70%가 감소되는 것으로 나타나 혈암-사암 시료의 전단변형을 증가에 따른 전단탄성계수의 감소율이 큰 것으로 나타났는데 이는 압밀배수(CD) 삼축시험으로 구한 응력-변형을 관계와도 일치하는 경향으로 보인다.

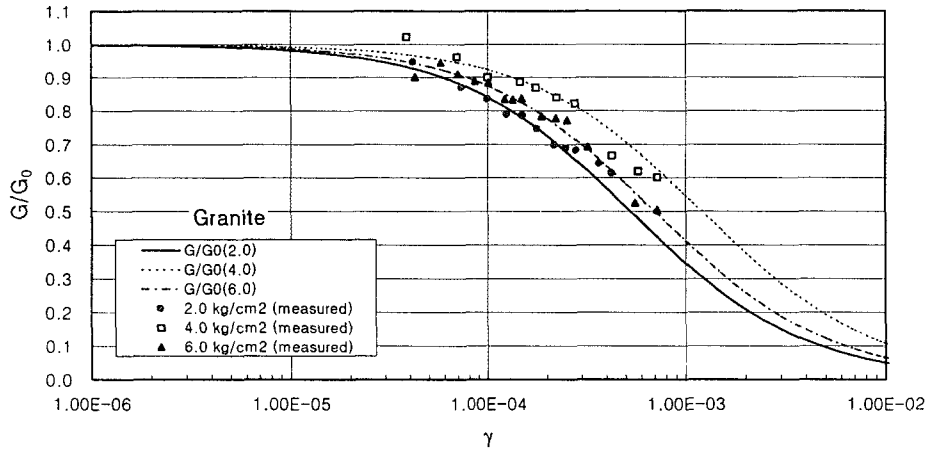


그림-10 화강암 시료의 전단탄성계수의 정규화 곡선

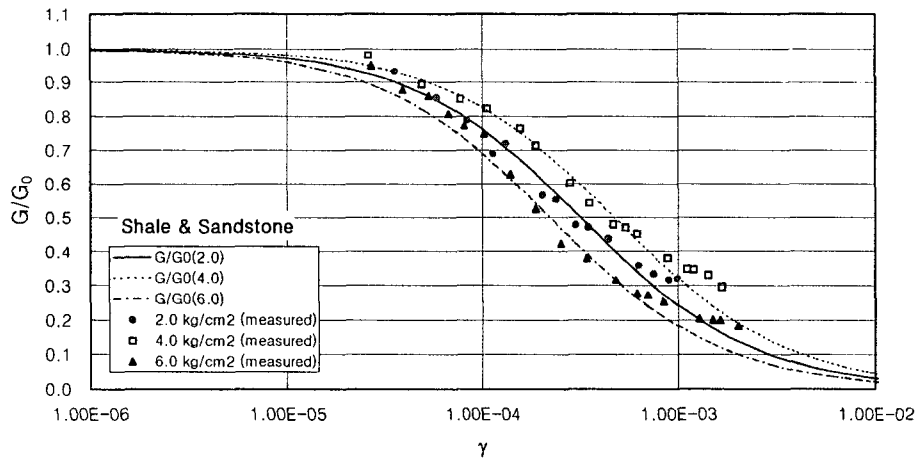


그림-11 혈암-사암 시료의 전단탄성계수의 정규화 곡선

### 6.2 전단탄성계수의 구속압 의존성

그림-12는 본 연구에 사용된 조립재료의 전단탄성계수의 구속압 의존성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 2종류의 시료 모두 구속압이 증가함에 따라서 최대전단탄성계수가 증가하는 경향을 나타내었으나 화강암 시료의 경우가 구속압이 증가함에 따라서 최대전단탄성계수의 증가율이 혈암-사암 시료 보다 크게 나타났다.

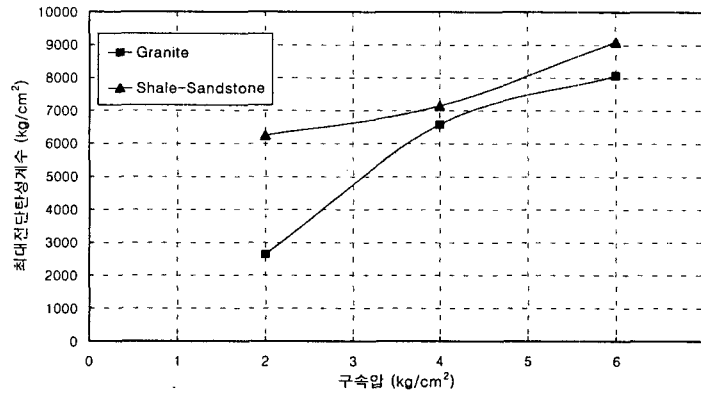


그림-12 전단탄성계수의 구속압 의존성

## 7. 결론

본 연구에서는 댐 축조용 암석재료(Rockfill)의 동적변형특성을 파악하기 위하여  $10^{-5}$ 이하의 저변형을 측정이 가능한 대형진동삼축시험기를 사용하여 반복재하삼축시험을 실시하였으며, 시험시료로 사용된 화강암 및 혈암-사암 등의 암석재료에 대한 동적변형특성 시험결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 화강암 시료는 전단변형을  $\gamma=3.8 \times 10^{-5} \sim 4.3 \times 10^{-5}$ (내부변위계로 측정한 값)의 범위에서 최대전단탄성계수  $G_{max}$ 는 2631.6~8064.5 kg/cm<sup>2</sup>(Poisson비=0.33), 최대감쇠정수  $h_{max}$ 는 21.6~30.8%의 범위로 나타났다.
- (2) 혈암-사암 시료는 전단변형을  $\gamma=2.6 \times 10^{-5} \sim 3.6 \times 10^{-5}$ (내부변위계로 측정한 값)의 범위에서 최대전단탄성계수  $G_{max}$ 는 6250.0~9090.9kg/cm<sup>2</sup>(Poisson비=0.35), 최대감쇠정수  $h_{max}$ 는 16.8~25.4%의 범위로 나타났다.
- (3) 정규화된 전단탄성계수곡선(normalized shear modulus curves)를 비교해본 결과 화강암 시료는  $G/G_{max}$  값이  $\gamma=10^{-4}$  부근에서 불과 10%정도 감소되나 혈암-사암 시료의 경우에는 약 20%가 감소되고,  $\gamma=10^{-3}$  부근에서는 각각 55%와 70%가 감소되는 것으로 나타나 혈암-사암 시료의 전단변형을 증가에 따른 전단탄성계수의 감소율이 큰 것으로 나타났는데 이는 압밀배수(CD) 삼축시험으로 구한 응력-변형을 관계와도 일치하는 경향으로 보인다.
- (4) 화강암 시료와 혈암-사암 시료 모두 구속압이 증가함에 따라서 최대전단탄성계수가 증가하는 경향을 나타내어 구속압 의존성을 보였으며, 화강암 시료의 경우가 구속압이 증가함에 따라서 최대전단탄성계수의 증가율이 혈암-사암 시료 보다 크게 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 한국수자원공사의 연구비 지원(2002년)에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 신 동훈 등(2002), *반복재하 삼축시험에 의한 조립재료의 동적특성 연구*, 한국수자원공사.
2. 신 동훈 등(2001), *대형삼축시험기를 이용한 댐재료의 전단강도특성 연구*, 한국수자원공사.
3. ASTM(2002), *2002 Annual Book of ASTM Standards*.
4. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P.(1972), "Shear Modulus and Damping in Soils : Measurement and Parameter Effects", *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, Vol.98, SM6, June, 1972, pp.603~624.