

## 벤더 엘리먼트에 의한 미소 변형을 측정장치의 개발 및 적용 Development and Evaluation of Laboratory Testing Equipment for Small Strain Range by Bender Element

황성춘<sup>1)</sup>, Seong-Chun Hwang, 토시유키 미타치<sup>2)</sup>, Toshiyuki Mitachi, 사토루 시부야<sup>3)</sup>, Satoru Shibuya

<sup>1)</sup> 지오 디벨로퍼 대표, President, Geo-Developer

<sup>2)</sup> 일본 북해도 대학 대학원 교수, Prof., Hokkaido University, Japan

<sup>3)</sup> 일본 북해도 대학 대학원 조교수, Associate Prof., Hokkaido University, Japan

SYNOPSIS: In the present study, A newly designed consolidometer and automatically versatile triaxial apparatus with high performance digital servo motor, which is able to measure small strains in the wide strain range from  $10^{-6}$  to  $10^{-1}$ , and to measure elastic shear wave velocity of clay specimens during consolidation and shear stage, was developed. After verification of the performance of the apparatus by a series of tests using a reconstituted clay, anisotropically (or  $K_0$ ) consolidated and  $K_0$  rebounded undrained triaxial compression and extension tests with measurement of elastic shear wave velocity was performed

Key words: bender element, soft clay, consolidometer, triaxial apparatus, small strain, reconstituted

### 1. 서론

점성토 지반에 있어서 흙 요소의 변형 거동에는 응력과 변형율의 이력과 재하시의 응력 조건 및 시간 효과 등의 요인에 의해 크게 영향을 받고 있다는 것이 많은 연구 결과에 의해 명백해지고 있다. 또, 지반 재료로서의 흙 요소는 단순한 선형 등방 탄성체가 아니기 때문에 그 변형 거동은 강한 변형을 및 응력 레벨의 의존성을 가지고 있다. 따라서 단조 및 반복 재하시의 변형 거동의 관계도 극히 복잡하기 때문에 전과정의 변형 거동을 정확히 파악하기 위해서는 미소 변형을 영역에서부터 파괴에 이르기까지의 광범위한 변형을 영역(약  $10^{-6} \sim 10^{-1}$ 까지)에서의 단조 및 반복 재하시의 변형 특성을 상세히 조사해 볼 필요성이 있다.

이와 같은 관점으로부터 특히 최근의 약 10년부터 15년 동안 미소 변형을 레벨( $10^{-5}$ 이하)에서의 지반 재료의 변형 계수를 정확히 구하기 위한 수많은 노력들이 있었다. 이것은 ①근접 시공 등의 실제의 지반 변형 문제에 있어서는 0.1%이하의 변형을 레벨에서의 거동이 중요하게 된다는 것과 ②특히, 경질 점성토의 경우에는, 원위치 탄성과 속도로부터 구한 전단 강성을  $G_r$  과 실내 시험으로부터 구한 전단 강성을  $G_{max}$  가 일치하지 않는 경우가 많은 것 등의 지적을 배경으로 하고 있다. 후자에 대해서는 불교란 시료를 이용한 실내 시험으로부터 구한 전단 강성을  $G_{max}$  는 ①실험 정도의 문제 ②공시체의 교란의

영향 ③ 샘플링되어진 시료가 반드시 그 대상 지반의 평균적 특성을 대표하지 않는 것 등이 그 이유이다.

그 중에서도 결과에 중대한 영향을 미치는 실험 정도의 문제는 주로 삼축 압축 시험을 수행할 때에 베딩 에러 및 장치의 컴플라이언스(Compliance)에 의해 발생되어지는 것으로서 장치의 개량 및 미소 변형을 측정 시스템을 이용하는 것에 의해 개선 가능한 것이 알려져 있어 근년의 컴퓨터 및 제어 장치의 눈부신 발달에 힘입어 많은 시도가 이루어지고 있다. 또, 미소 변형을 레벨( $10^{-6}$  정도)에서의 변형 계수인 원위치 전단 강성을  $G_f$ 는 원위치 탄성과 속도  $V_s$ 로부터  $G_s = \rho V_s^2$  ( $\rho$ : 흙의 습윤 밀도)의 식으로 구하는 경우가 많다. 이것은 다른 원위치 시험 방법에 비해, ① 비교적 조작성이 간단하고 또, ② 얻어진 결과는 어떤 크기를 가진 지반의 평균적인 변형 계수로서 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 또, ③ 내진 설계에 필요한 파라미터로서만이 아닌 액상화 강도에 미치는 공시체 교란의 영향 평가 파라미터로서의 연구도 이루어지고 있다. 그러나 탄성과 탐사 결과로부터 얻어지는 전단 강성율이 원위치의 응력이나 변형율의 조건을 반영한 것인가 어떤가를 확인하기 위해서는 원위치의 수많은 응력과 변형율의 이력 및 재하 조건에 대응시킨 실내 시험에 의해 개개의 요인의 영향을 개별적으로 파악할 필요가 있다. 이와 같은 경우 주로 이용되는 실험법으로는, ① 공진법 토질 시험, ② 초음파 속도 측정법, ③ 반복 삼축 시험 및 비틀림 전단 시험법, ④ 벤더 엘리먼트에 의한 방법 등을 들 수 있다. 이 중에서도 ④는 구미에서 잘 이용되는 방법으로서 벤더 엘리먼트라고 불리워지는 피에조세라믹을 표준 압밀 시험 장치 혹은 삼축 시험 장치에 장착하여 공시체에 탄성파를 발생 혹은 수신하여 탄성과 속도를 측정하는 것으로서, ① 시험 방법이 매우 간단하고 또, ② 비교적 작은 공시체를 사용하는 실내 시험에서도 시험이 가능하고, ③ 거의 모든 요소 시험장치에 장착할 수 있는 장점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 이와 같은 일련의 흐름에 따라 장치의 컴플라이언스를 최소한으로 억제하기 위해 새롭게 개발된 점성토용 전자동 삼축 장치와 삼축 장치 및 표준 압밀 시험 장치에 장착 가능한 벤더 엘리먼트 시스템의 개발에 대해서 논했다. 다음으로 각각 새롭게 개발된 장치를 이용한 실험으로부터 벤더 엘리먼트 시스템의 유용성을 확인함과 동시에 실험의 전과정을 통해서 통일적인 결과를 도출하는 것이 가능했다.

## 2. 벤더 엘리먼트 시스템을 장착한 표준 압밀 시험 장치 및 삼축 시험 장치의 개발

### 2.1 벤더 엘리먼트의 원리

벤더 엘리먼트는 2장의 얇은 피에조세라믹(Piezoceramic)판을 이용하여 샌드위치와 같은 겹친 구조로 만든 것이다. 그림 1.은 벤더 엘리먼트의 원리와 전압을 부여했을 때의 벤더 엘리먼트의 거동 및 본 실험 장치에 장착했을 때의 거동을 나타낸 것이다. 원리로서는 외부로부터 전압을 부여하면 각 피에조세라믹의 판이 각각 신장 및 압축 방향으로 변형하여 벤더 엘리먼트 전체에 굽힘 변형이 발생한다. 즉, 전압을 부여하면 진동이 발생하는 벤더 엘리먼트를 외팔 보로 하여 기진에 이용한 것이다. 또, 이것과는 역으로 외부로부터 벤더 엘리먼트에 휨 변형이 가해지면 각 피에조세라믹판에 각각 압축 및 신장 방향으로 변형이 발생하여 벤더 엘리먼트 내부에 전하가 일어나는 구조로 되어 있다. 즉, 진동을 전압으로 변환하여 수신을 가능하게 한 것이다.

이와 같은 원리로 벤더 엘리먼트를 이용하는 것으로 간단하게 전단파의 발생 및 수신을 측정하는 것이 가능하다.

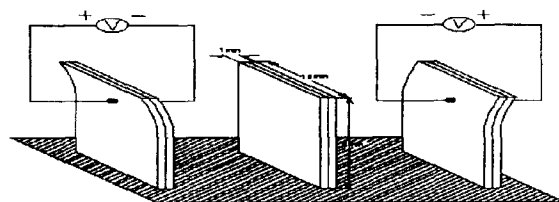


그림 1. 벤더 엘리먼트의 동작 원리 및 거동 형태

## 2.2 벤더 엘리먼트를 장착한 압밀 시험 장치

### 2.2.1 압밀 시험 장치

벤더 엘리먼트를 장착한 압밀 시험 장치의 개략도를 그림 2.에 나타내었다. 이 장치는 원래는 CRS 압밀 시험 장치로 개발된 것으로서 압밀 링, 상부 피스톤 및 하부 페데스탈을 개량한 것이다. 본 실험 장치에 세트 되어지는 공시체의 크기는 표준 압밀 시험 장치와 동일한 직경 6cm, 높이 2cm이다. 또 재하는 재하대에 고정되어 있는 복동형 벨로프램 실린더의 상부 챔버에 공기압을 공급하는 것에 의해 수행

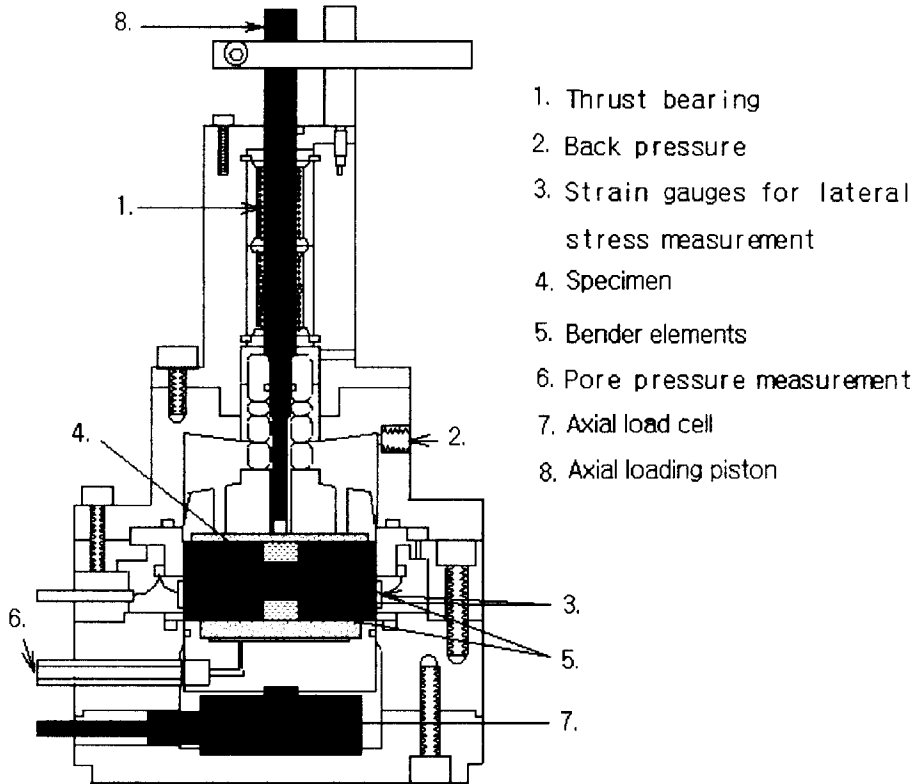


그림 2. 벤더 엘리먼트가 장착된 압밀 시험 장치의 내부 구조

되어졌다. 그리고, 압밀 링은 표준 압밀 시험 장치의 압밀 링과는 달리 압밀 링의 중앙부가 얇게 되어 있는 구조로 여기에 변형을 게이지가 붙여져 있어 이것으로 측방 변형율을 측정하는 것이 가능하다. 즉,  $K_0$ 값의 측정이 가능하다. 동시에 본 장치는 구조상 완전히 밀폐되어 있어 배압을 공급하도록 한 것도 표준 압밀 시험 장치와 다른 점이다. 이것은, 전단파 속도  $V_s$ 로부터 전단 강성을  $G_{max}$ 를 구할 때에 문제가 되는 공시체의 포화도를 높이게 하는 것과 유효 응력 조건에서의 실험을 가능하게 하기 위해서이다. 또한 주변 마찰을 줄이기 위해 압밀 링의 측면은 테프론 가공 및 실리콘 그리스를 도포했다.

### 2.2.2 벤더 엘리먼트

전단파 발생 장치인 평선 제리레이터로부터 발생된 전기적인 신호(약 5 ~ 7V)가 상부 피스톤에 장착된 발신용의 벤더 엘리먼트에 부여하는 것에 의해 공시체에 전단파를 부여할 수 있다. 또, 하부 페데스탈에 장착된 수신용의 벤더 엘리먼트를 이용하여 공시체 내부에 전달된 전단파의 전기적 신호(약  $0.1\mu$  sec)를 수신하는 것이 가능하다. 모든 전기를 사용하는 실험 장치가 그러하듯이 본 실험 장치도 노이즈 발생이 문제로 되어 시험 장치와 인접해 있는 컴퓨터의 배선 부분 전체와 수신측의 벤더 엘리먼트의 리더선을 알루미늄 호일로 피복했고, 동시에 안정된 기준 전위를 획득하기 위하여 그 배선을 오실로스코프의 어스 단자에 접속하는 것에 의해 어느 정도 해결하는 것이 가능했다. 위에서 설명한 것과 같이 몇 개의 구성 요소를 제외하고는 표준 압밀 시험 장치와 전혀 동일한 구조이고 여기에 두개의 벤더 엘리먼트를 장착한 극히 구조가 간단한 실내 탄성파 속도 시험법인 것을 쉽게 알 수 있다.

## 2.3 삼축 장치에 설치된 벤더 엘리먼트 시스템의 개발

### 2.3.1 개발되어진 삼축 시험장치 및 미소 변형을 측정 시스템

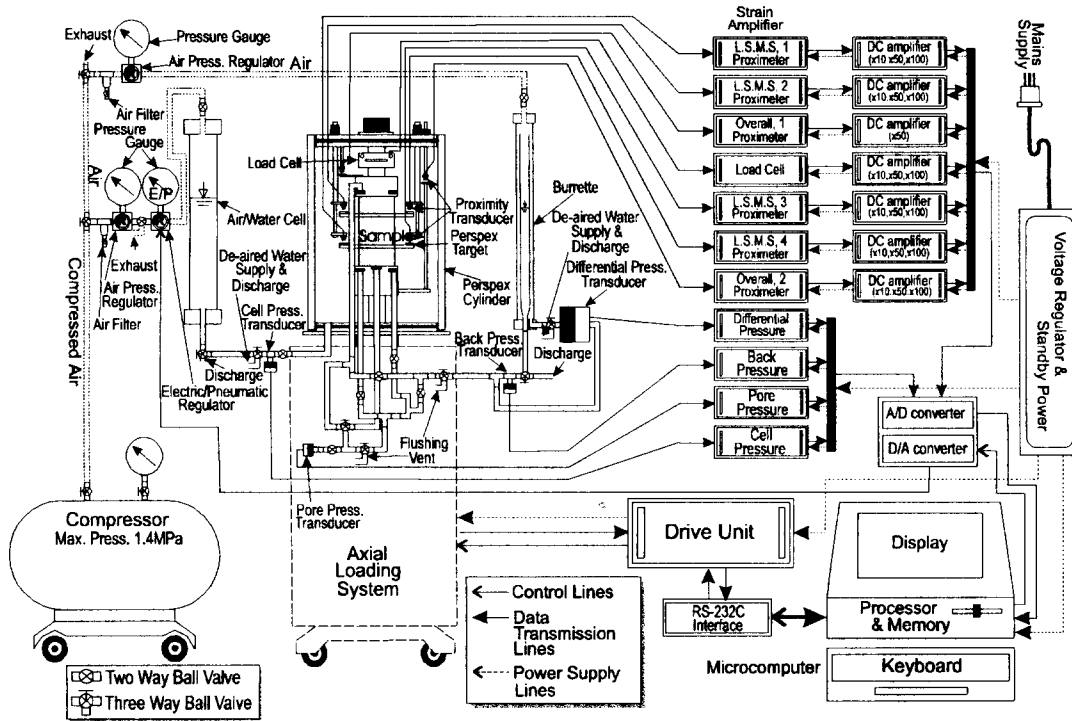


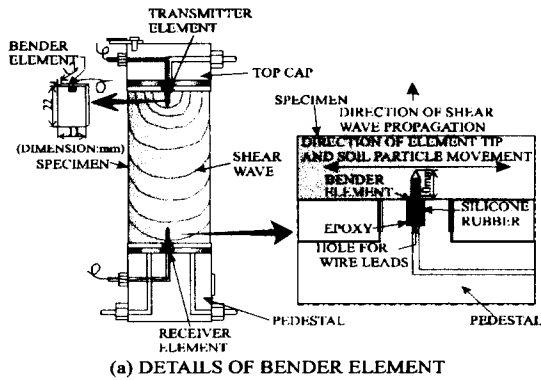
그림 3. 새롭게 개발된 삼축 시험 장치의 시스템도 (미소 변형을 측정 장치를 포함)

본 연구에서 점성토용(허용 축하중 2.5kN)으로 개발된 전자동 다기능 삼축 시험 장치를 그림 3.에서 나타내었다. 이 삼축 장치는 ①삼축 셀부분의 구조, ②응력 및 변형의 측정 원리, ③축 변위 및 축 응력 재하 시스템의 측정 원리로 분리하여 설명할 수 있으나 본 논문에서는 장착되어진 벤더 엘리먼트 시스템에 주안점을 두었기 때문에 지면 관계상 생략한다.

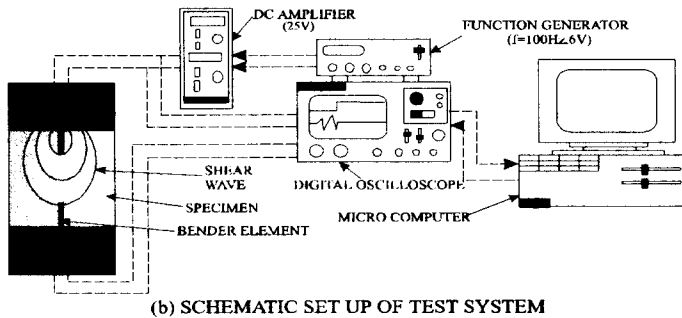
또한 본 삼축 시험 장치에서는 저자가 개발한 점성토용의 미소 변형을 측정 시스템(Local Strain Measuring System, 이하 LSMS)을 장착하여 실험하는 것이 가능하며 또, 본 논문에 실린 실험 결과에도 반복하여 제시되는 경우가 있으나 이것은 어디까지나 공시체의 양 단면이 벤더 엘리먼트에 의해 교란되는 것을 보정하는 역할 정도로서 LSMS가 사용되어진 것으로 이해해주시기 바란다. 즉, 본 논문에서는 지면 관계상 미소 변형율의 중요성을 논하지 않았으며 미소 변형율에 관해 참고하고 싶다면 저자의 다른 논문을 참고하기 바란다.

### 2.3.2 삼축 장치에 장착 할 수 있는 벤더 엘리먼트 시스템

본 시스템은 압밀 및 전단을 포함하는 실험의 전과정에 있어서 공시체의 전단파 측정 목적을 하여 삼축 시험 장치의 캡 및 페데스탈에 벤더 엘리먼트(이하, BE)를 설치했다. 즉, 통상의 시험용 캡 및 페데스탈 대신에 BE를 장착한 것으로 바꾸어 설치하는 것에 의해 전단파의 측정이 가능하게 된다.



(a) DETAILS OF BENDER ELEMENT



(b) SCHEMATIC SET UP OF TEST SYSTEM

그림 4. 벤더 엘리먼트 측정 시스템의 개략도

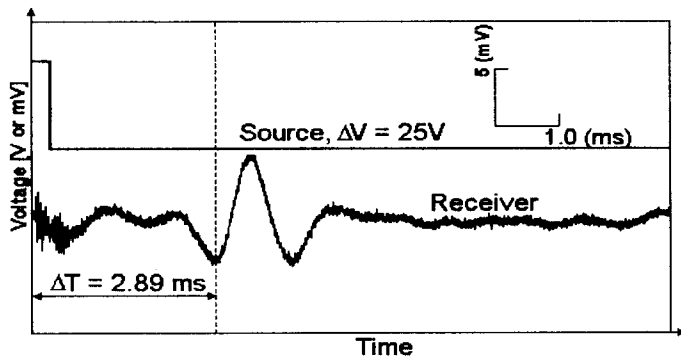


그림 5. 벤더 엘리먼트 시험에 의한 전형적인 파형

장착하지 않은 경우, ③LSMS+BE장착의 경우, ④LSMS+BE장착의 신장 시험과, ⑤LSMS+BE장착의  $K_0$ 과압밀 공시체( $OCR=10$ )에 대한사의 압축 시험 등의 5종류의 일련의 실험을 수행하였다. ①~④는 유효 주응력비  $K=0.5$ 로 이방 압밀 뒤의 비배수 삼축 압축(신장)시험이고 또, ⑤는  $K_0$ 압밀 팽창 뒤의 비배수 삼축 압축 시험이다.

표 1. 실험 조건

|                 | with LSMS      | without LSMS   | LSMS+BE                      |
|-----------------|----------------|----------------|------------------------------|
| $CK_{0.5}U$     | Compression(①) | Compression(②) | Compression(③), Extension(④) |
| $CK_0U(OCR=10)$ |                |                | Compression(⑤)               |

그림 6.은 이방 압밀 혹은  $K_0$ 압밀시 및 비배수 단조 전단시의 유효 응력 경로의 대표적인 예이다. 우

원위치 탄성과 속도 시험에서는 실현이 어려운 많은 실험 조건이 설정 가능하다. 여기에서 사용한 BE의 디멘션은 높이 22mm, 공시체 삽입 높이 10mm, 폭 11mm, 두께 1.2mm이고, 또한, BE의 양 선단부는 공시체 세트 시에 있어 양 단면에 쉽게 삽입 가능하도록 쉘기 형상으로 가공했다. 재질은 압밀 시험 장치의 것과 마찬가지로 피에조세라믹이다. 또, 입력 전압  $V_{pp}$ 는 약 25V이고 일련의 실험에 이용한 파형은 사각형 파이고 주파수  $f$ 는 100Hz로 했다.(그림 4.)

그림 4.는 삼축 시험 장치에 장착된 벤더 엘리먼트 측정 시스템의 개요를 나타내고 있다. 동시에, 그림 5.는 교란되지 않는 일본의 아리아케 시료의 세트 직후의 파형의 형태이다. 또한, 여기서는 노이즈를 없애기 위해 오실로스코프에서 스무징(Smoothing)을 수행하였다.

### 3. 본 시스템들에 의해 일어난 전형적인 실험 결과

#### 3.1 실험 개요

개발되어진 삼축 시스템에 장착된 BE 측정 시스템의 성능 및 정도를 검증(압밀 시험 장치에 장착된 BE 측정 시스템의 검증은 표준 압밀 시험 및 본 삼축 시험 방법에 준하여 수행하였다.)하기 위하여 실내 재구성 점성토 공시체 ( $\phi=50mm$ ,  $H=100mm$ , 일차원 압밀 압력  $\sigma'_v=150kPa$ , NSF-Clay( $I_p=26$ ,  $W_L=55\%$ ,  $\rho_s=2.78g/cm^3$ ))을 이용하여 표1.에 표시한 것과 같이 ①LSMS를 장착한 경우, ②LSMS를

선, 초기 유효 응력 35~40kPa의 등방 상태에서 배수 밸브를 연 상태에서 축 응력 증가 속도  $d\sigma_a/dt=0.5kPa/min$  일정 (팽윤시는  $d\sigma_a/dt=1.0kPa/min$  일정)으로 축방향 압밀 응력을 증가시켰다. ①~④의 시험에서는 주응력비  $K(=\sigma_v'/\sigma_a')=0.5$ 에 도달한 뒤에 그 뒤의  $\sigma_a'$ 의 증가에 동반하여  $K$ 가 변화하지 않도록 축방 유효 응력  $\sigma_v'$ 를 자동적으로 조정하여 평균 유효 주응력  $p'=(\sigma_a'+\sigma_v')/3=200kPa$ 까지 압밀했다. 소정의 최종 유효 응력 상태(그림 6.의 A점)에 도달한 뒤에  $\sigma_a'$  및  $\sigma_v'$ 를 각각 유지한 상태에서의 체적 변형율(간극비)~시간 관계에 3T법을 적용하여 압밀를 종료했다.(그림 7.) 또, ⑤의  $K_0$ 압밀시에는 축압축량  $\Delta H$ 체적 변화량  $\Delta V$ 를 측정하여 공시체 단면적이 일정하게 되도록 축방 응력을 제어하는 방법으로 수행했다. 이 과정에서 축방 변형율의 제어는 압축측의 변형율이 발생한 경우는 축압을 증가 시키고 또, 팽창측으로 나온 경우는 축압을 감소시키는 방법인 양면 제어법을 사용하였다.

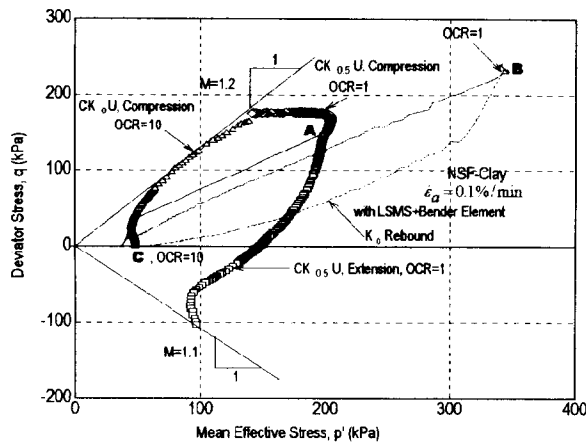


그림 6. NSF-Clay의 응력 경로

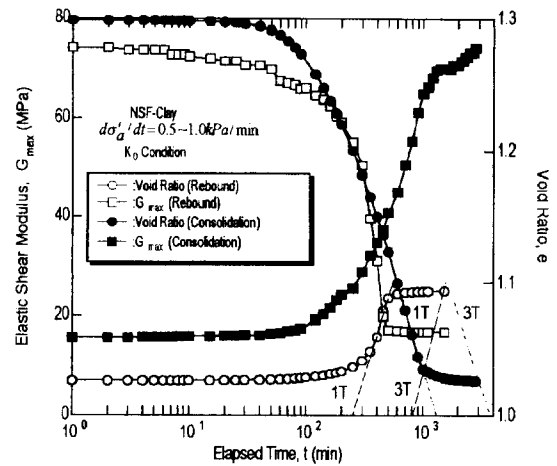


그림 7. NSF-Clay의 e와  $G_{max}$ 와의 관계

### 3.2 실험결과 및 고찰

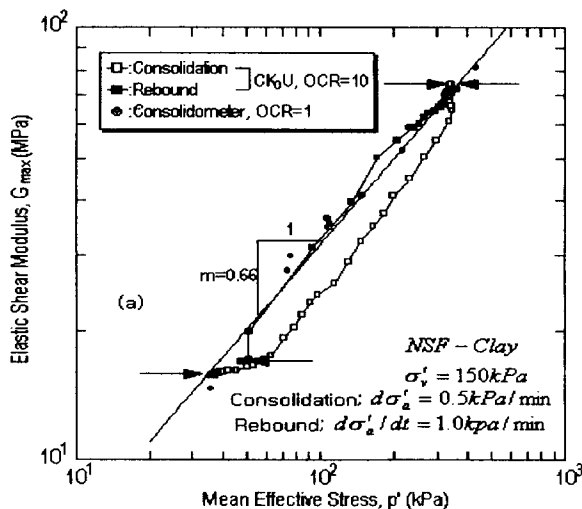


그림 6.은 주응력비  $K(=\sigma_v'/\sigma_a')=0.5$ 압밀을 수행한 시료와  $K_0$ 조건에서의 재하 및 제하를 수행한 시료의  $K_0$ 압밀 및 전단시의 유효 응력 경로이다.  $K_{0.5}$ 이방 압밀 및 압밀시의 유효응력 경로의 기울기가 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 또, 2종류의 실험 시리즈 모두 압밀 초기로부터 최종 단계까지 유효 응력의 경로의 기울기가 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 제하시의 유효 응력 경로의 기울기는 일정한 것이 아니라 실험의 전과정을 통하여 변화하고 있는 것을 알 수 있다.(그림 6.의 경로 BC) 즉, 재구성 시료에서는 재하만의 경우에는  $K_0$ 값(=0.53)에 근사한 주응력비로 이방 압밀을 수행

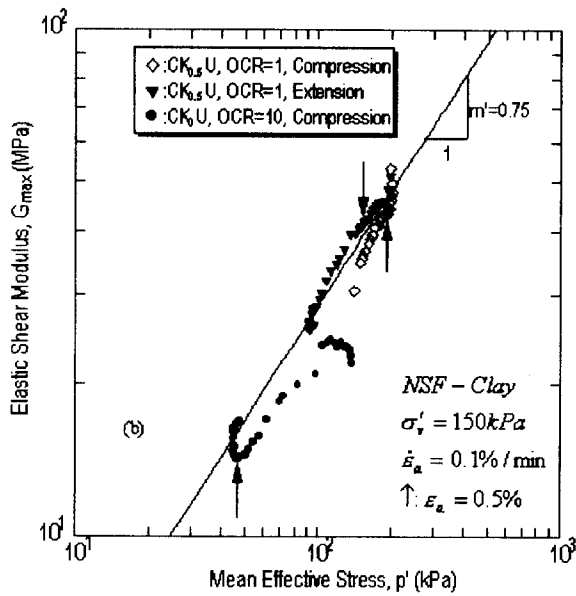


그림 8. NSF-Clay의  $G_{max}$ 와  $p'$ 의 관계

재하 압밀 시험의 압밀 종료시의  $G_{max}$ 와 삼축 시스템에 장착된 BE 시스템으로부터 얻어진 전단 강성을과 평균 유효 응력의 대응 관계를 나타낸 것이다. 평균 유효 응력의 모든 측정 영역에 있어서 직선성이 보이며 그 기울기가  $m=0.66$ 으로 두 종류의 다른 시스템에 의해 측정되어진 측정값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또,  $CK_0U$  시험의 경우, 점증 재하에 의한 압밀 방식을 택하고 있기 때문에 그림 8.의 압밀 개시점(그림 속의  $\rightarrow$  마크)과 압밀 종료점(그림 속의  $\leftarrow$  마크)만이 단계 재하의 압밀 시험 결과와 직접적으로 비교 가능한 것이기 때문에  $K_0$ 압밀중의 다른 점에 있어서는 같은 평균 주응력하에서의 단계 재하 압밀의 전단 강성을  $G_{max}$ 와 단순히 비교하는 것은 적합하지 않다. 그 이유로서, 그 응력에 있어 압밀이 완전히 종료되지 않은 상태로 있기 때문이다. (b)그림은 전단 과정에 있어서의 전단 강성을과 유효 평균 응력의 관계를 보이고 있다. 압축, 신장, OCR 등의 조건에 영향을 받는 일 없이 압밀 과정에서와 동일하게 전단 강성을  $G_{max}$ 와 평균 유효 응력  $p'$ 의 일의적인 관계가 보여진다. 그리고, 축 변형율이 5%이상(그림 속의  $\uparrow$  마크)에 있어서의 플롯한 점의 직선( $m=0.75$ )으로부터의 벗어남은 전단면의 발생 등에 기인하는 것이라고 사료된다. 즉, 본 실험의 경우에 있어 LSMS를 장착하고 있는 관계상, 삼축 셀의 외부로부터의 공시체의 변형 사항을 관찰하는 것은 용이하지 않으나 축 변형율 5% 전후로부터 공시체의 변형이 크게 발생하여 본 실험에 있어 대부분의 경우에 있어 전단면이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

압밀 시험 장치에 장착 가능한 BE시스템과 점성토의 압밀 및 전단 과정에서의 BE 시스템이 장착된 고성능 서보 모터식 전자동 다기능 삼축 시험기를 개발하여 재구성 공시체를 이용하여 실험 장치의 성능의 검증을 위해 일련의 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 표준 압밀 시험 장치와 거의 동일한 압밀 시험 장치에 BE시스템을 장착하는 것에 의해 전단 강성을을 구하는 것이 가능했다. 이것으로 미루어 표준 압밀 시험에 장착하는 것도 가능하여 기존의 장치를 이용하여 간단하고 저렴한 비용으로 전단 강성을을 구할 수 있는 것이 확인 가능했다.
- ② 삼축 시험 장치에 BE 시스템을 장착하는 것에 의해 압밀과 전단의 전 실험 과정에 있어 전단 강성

율을 정도 높게 측정하는 것이 가능했다.

- ③ ①~②의 결과로부터 동일한 시험 조건이라면 시험 장치와 공시체의 디멘션에 거의 영향받지 않음을 알 수 있었다. 그러나 많은 다른 연구자들에 의하면 파형의 선택 등에 따라 다른 결과가 야기되기도 하여 이 결론은 더 많은 데이터의 축적이 필요하다고 본다.
- ④ BE시스템은 전단 강성율을 구하는데 있어 가장 손쉬운 방법의 하나임을 알 수 있다. 그러나, 아직 미확인 분야도 많이 남아 있다. 예를 들어, 드라이빙 거리의 문제, 적당한 파형 선택의 어려움, 과도한 노이즈의 생성, P파와 S파 구별 및 판독의 어려움 등을 들 수 있다.

## 참고 문헌

1. SHIBUYA, S., HWANG, S. C. and MITACHI, T.(1997), Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement, *Geotechnique* 47, No. 3, pp. 593-601
2. 황 성춘 외(1997), 점성토의 압밀 및 전단 과정에서의 미소 변형을 측정 시스템을 갖춘 삼축 시험 장치의 시작, 일본 지반 공학회 북해도 지부 기술 보고집, 제 37호, pp. 191-200.
3. Dyvik, R. and Madshus, C.(1985), *Laboratory measurements of Gmax using bender elements, Proc. Of ASCE Annual Convention, Advances in the art of testing soils under cyclic conditions, Detroit*