

# 입방체 점토시료에 대한 압밀 비배수 삼축압축 및 평면변형률 시험

Consolidated Undrained Triaxial Compression and Plane Strain Tests  
on Cubical Clay Specimen

朴炳基\*<sup>1</sup>

Park, Byong-Kee

李康日\*<sup>3</sup>

Lee, Kang-Il

康權修\*<sup>2</sup>

Kang, Kwon-Soo

鄭鍾範\*<sup>4</sup>

Jung, Jong-Bum

---

## Abstract

This study aims at investigating the mechanism and operation of cubical triaxial test developed by Lade in order to obtain analysis on the clayey foundation deformation. A comparison on deviator stress, pore water pressure and stress path is made between test results of clay using the cubical consolidated undrained test as well as plane strain test.

## 요 지

본 문은 입방체 삼축시험기에 의한 점토지반의 특성을 연구하기 위하여 Lade형의 삼축시험기를 시험제작하여 그 특성을 논하고 이 시험기를 이용하여 점성토에 대해서 압밀 비배수 시험과 평면변형률의 실험결과를 바탕으로 입방체 시료와 평면변형률 상태의 시료에 대해서 축차응력, 간극수압, 응력경로 등에 대해서 상호 비교한 것이다.

---

## 1. 서 론

흙의 변형에 대한 체계적인 연구「항복(yield), 파괴(failure), 파단(rupture)」은 응력-변형률 관계를 통해서 오래전 부터 Mohr-Coulomb, Tresca, von Mises의 기준을 이용하

였다. 이를 바탕으로 Lade는 3축( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )면에서 전단 항복곡면이 단조로운 하중에 의해서도 소성변형이 고려되도록 하고 또 평균주응력에 의해서도 소성체적변형이 고려되도록 하고 평균주응력에 의해서도 소성체적변형이 고려될수 있도록 구형(球形)의 체적항복 곡면을 합성한 Lade 모델을 제안 하였다. 이 이론은 탄

---

\*<sup>1</sup> 정회원, 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*<sup>2</sup> 정회원, 서남대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

\*<sup>3</sup> 정회원, 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*<sup>4</sup> 정회원, 전남대학교 대학원 토목공학과 석사과정

· 소성 모델로서 비선형의 응력-변형 거동을 광범위하게 해석할 수 있으며 일경화(work-hardening)뿐만 아니라 파괴후의 일연화(work-softening)까지 설명 가능하다. 또한 입상토(모래)에 대해서는 응력-변형 관계를 거의 완벽하게 설명하며 점성토에서도 확장 해석 가능하다고 하였다.<sup>9-13)</sup> 이 모델은 다른 구성식이 갖추지 못하는 어떠한 응력경로에 대해서도 일정한 토질매개 변수를 얻을 수 있어 통상적인 실험(압밀 비배수 시험과 등방압밀 시험)만으로도 광범위한 응력경로 상태의 지반거동을 예측하며 배수조건에 관계없이 일정한 토질매개 변수를 구할 수 있다.<sup>9, 11)</sup> 한편 이 모델은 일연화(work-softening)영역에서의 응력-변형 거동은 그 정밀도가 약간 떨어지며 기존의 토질매개 변수와 연관성이 수립되지 않아 기존 데이터의 활용이 어려운 단점을 안고 있다.<sup>4, 9)</sup>

본 연구는 이 이론을 바탕으로 한 기초실험으로서 점토에 대하여 입방체형 축대칭 시료의 압밀 비배수 삼축압축시험과 평면변형률 시험을 통해서 축차응력, 간극수압 및 응력경로에

대해서 검토하고 평면변형률 시험에 대한 중간주응력의 영향에 대해서도 알아 보고자 한 것이다. 이를 기초로 하여 앞으로 정확한 토질 매개변수를 구하여 점성토에 대한 Lade모델의 적용성을 검토함과 아울러 다른 파괴규준과도 상호 비교하고 이를 근거로 모형지반에 대한 수치해석과 나아가 실제지반에 이용하고자 하는 그 기초연구의 일환이다.

## 2. 실험

### 2.1 시료의 조제 및 물리적 특성

본 연구에 사용된 시료는 영산강 하류(전남 무안군 해제면)에서 채취하여 반입한 해성 충적토이다. 이 시료를 수조에 투입하여 완전히 교반시킨후 No.120번 체를 통과시켜 현탁(slurry)상태에서 2차원 재하시험용 토조에 넣는다. 이 토조에 0.5kgf/cm<sup>2</sup>의 수압으로 약 3개월간 압밀 재생성한 점토이다. 본 토조의 압밀장치는 그림-1에 나타낸다.

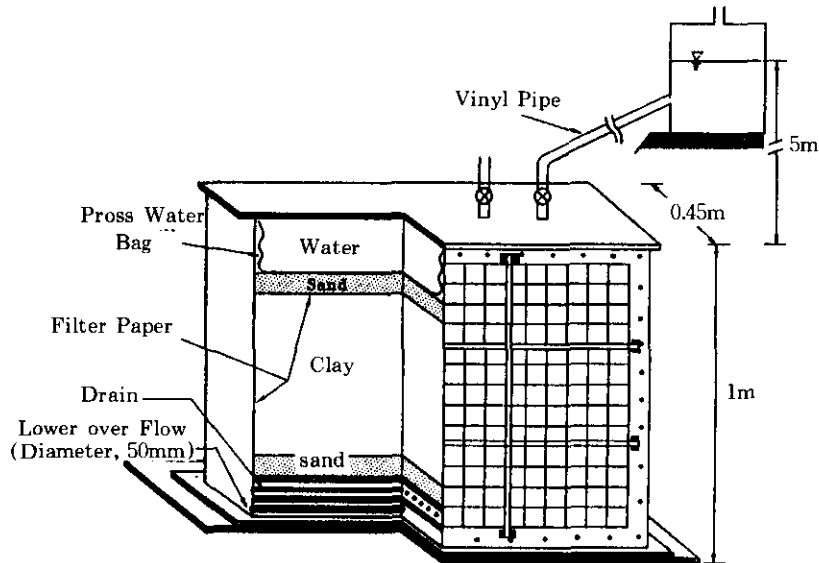


Fig.1 Consolidation apparatus

재하토조에서 채취한 무안점토의 물리적 특성은 표-1과 같고 또한 이 시료는 그림-2에서와 같이 200번체 통과량이 98%인 고압축성 점토이다.

Table 1. Physical Properties of Soil

G <sub>s</sub>	LL(%)	PL(%)	PI(%)	USCS	Activity	W <sub>o</sub> (%)	q <sub>u</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
2.65	50	28	22	CH	0.7	43.8	0.21

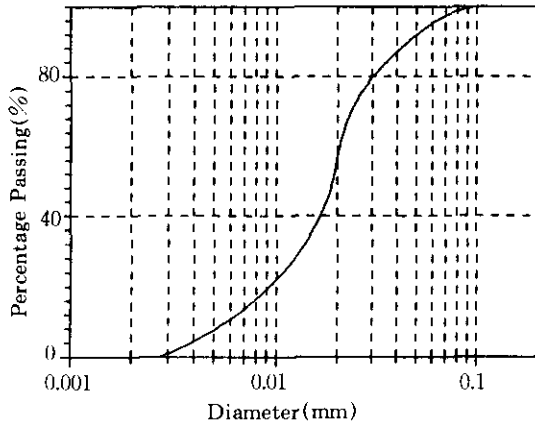


Fig.2 Grain size distribution curve for the moonan clay

## 2.2 실험장치의 특성 및 제원

### 1) 기본 형상

본 연구에 사용된 입방체 삼축시험기의 전체적인 시스템과 삼축실에 시료가 설치된 단면을 그림-3(a),(b)에 나타낸다.

입방체 삼축시료의 크기는 76mm×76mm×76mm이다. 삼축실에 작용하는 모든 응력이나 간극수압, 중간주응력 등의 조절기능은 외부에서 조작하며, 그 기본적인 Mechanism은 일반 삼축시험과 거의 비슷하다. 그림-3(b)에서 보는 바와 같이 시료는 상부덮개(load cell)와 저부 받침대(base) 사이에 고무막(membrane)으로 둘러싸여 있다. 최소주응력( $\sigma_3$ )은 수평방향으로 작용하도록 삼축실 압력(수압)으로 가하고, 연직하중은 변형제어 방식으로 재하한다. 최대 주응력( $\sigma_1$ )은 상부덮개 안에 부착된 Loa-

d Cell의 변형게이지(strain gage)를 통하여 삼축실 밖에 위치한 디지털 기록장치를 통한 축차응력(deviator stress)으로부터 구한다. 축( $\sigma_1 - \sigma_3$ )를 측정함으로써 구할 수 있으며 축차응력을 가하기 전에 봉(rod)에 부착된 H-Beam에 의해 수평재하장치에 부착된 Balsa Wood를 먼저 압축을 한 후 상부 덮개(load cell)에 하중을 가하여 시료를 압축한다.

### 2) 중간주응력( $\sigma_2$ ) 장치

중간주응력( $\sigma_2$ )은  $\sigma_1$ 과 직교하게 작용할 수 있도록 그림-4와 같이 별도로 제작된 수평재하 장치(horizontal loading system)를 통해서 구한다. 이 장치는 피스톤 형태로 되어 있으며 피스톤 안에 접착력이 거의 없는 기름을 채운 후 삼축실 밖에 있는 디지털 장치를 통해서 축차응력, 축( $\sigma_2 - \sigma_3$ )를 응력제어 방식으로 가압하여 구할 수 있다. 이 피스톤으로 중간주응력을 조절하면서 평면변형률 시험과 중간주응력 계수(b)를 달리하는 경우의 시험을 할 수 있다.

### 3) 배수체계

그림-5에서 보는 바와 같이 하부 받침대(base)와 상부 덮개(load cell)를 통한 배수공을 통하여 시료를 포화시키거나 간극수압, 배압(back pressure)을 측정한다. 간극수압은 삼축실 밖에 설치한 간극수압 센서를 통하여 양면의 배수공을 이용하여 측정된다. 이러한 배수체계는 배수공이 시료와 직접 맞닿지 않도록 되어 있어서 배수체계가 다공질판(porous stone)으로 되어있는 일반 삼축시험보다도 단부의 마찰을 훨씬 쉽게 제거하여 자연스러운 파괴(zone failure) 형태로 될수 있다.

### 4) 변형량 측정

연직방향 변형률( $\epsilon_1$ )은 재하장치의 피스톤에 부착된 다이알 게이지에 의하여 삼축실 밖에서 측정하고 중간 주응력방향의 변형률( $\epsilon_2$ , 최대변위 20mm)은 그림-4에서 보는 바와 같이 수평재하장치에 부착된 포텐셜 메타에 의해 측정하며 최소 주응력방향의 변형률( $\epsilon_3$ , 최대변위

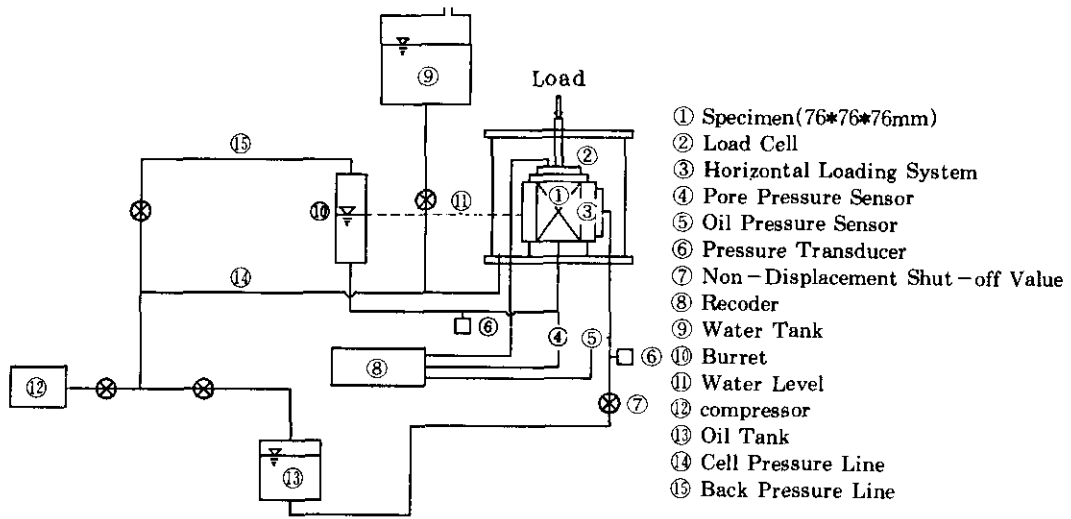


Fig.3 (a) Cubical triaxial test apparatus schematic

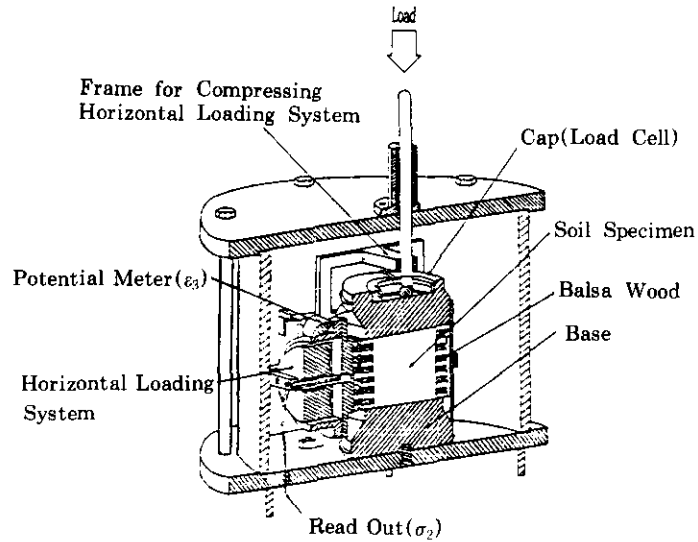
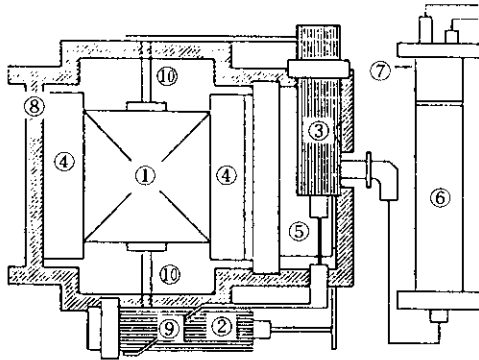


Fig.3 (b) Cubical triaxial test specimen set

30mm)은 중간 주응력 방향의 변형량 측정용 포텐셜메타(수중 측정용 변위계)에 직각으로 설치된 또 하나의 포텐셜 메타에 의해 측정할 수 있다. 이러한 모든 변형량은 외부에 있는 디지털장치로 연결되어 있다.



- ① Soil Specimen
- ② Potential Meter( $\epsilon_2$ )
- ③ Potential Meter( $\epsilon_3$ )
- ④ Solid Steel Plate and Piston
- ⑤ Horizontal Loading Piston
- ⑥ Hydraulic Oil
- ⑦ Oil Tank
- ⑧ Tie-Bar
- ⑨ Arm
- ⑩ Clip Gage( $\epsilon_3$ )

Fig.4 Horizontal loading system device

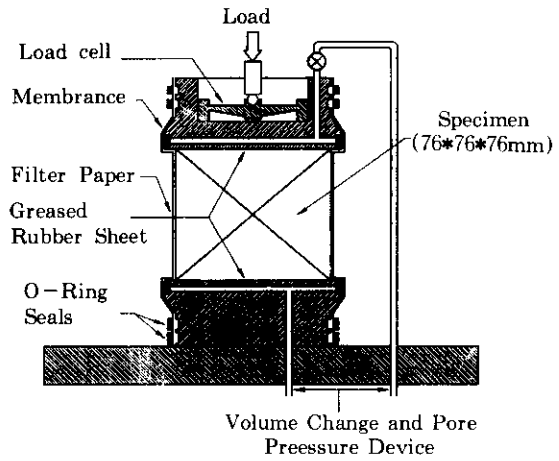


Fig.5 Drainage system

### 5) Balsa Wood

수평장치에 부착된 Balsa Wood의 특징은 본질적으로 세로 방향의 포아슨비는 0이며 섬유질 방향에 평행한 강도는 섬유질 방향에 수직인 강도에 비해서 상대적으로 적은 재료이다. 이 Balsa Wood를 물에 담근후 압축, 재압축하는 과정을 3회에서 5회 정도 반복하면 거의 반으로 줄어든 반면 회복률은 일정하게 되면서 Balsa Wood의 성질은 거의 변화가 없다. 이 Balsa Wood는 수평재하장치에 부착하여 중간 주응력제어시 축차응력의 작용을 원활하게 해주며 이를 그림-6에 나타낸다. 한편 이 Balsa Wood는 건축모형 제작등에 많이 이용되며 시판되고 있다.

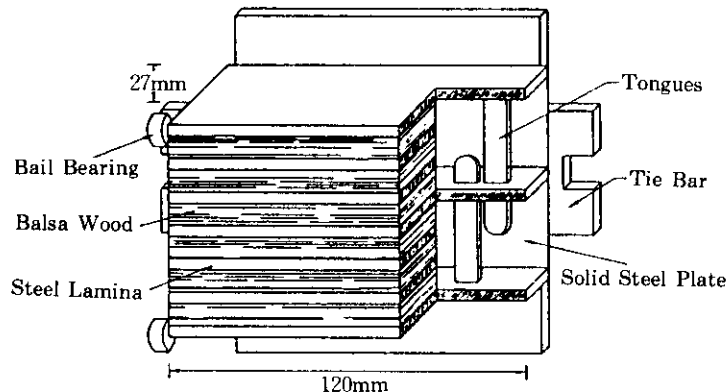


Fig.6 Balsa wood schematic

### 2.3 시험방법

그림-1에 있는 압밀토조에서 재생성한 정규압밀 시료를 채취하여 76×76×76mm으로 성형한다. 시료를 0.3mm 두께의 고무 멤브레인(membrane)으로 싸아 정위치에 놓는다. 시료를 삼축실내에 설치하기에 앞서 시료와 상부 덮개(cap, load cell : Max=250kg) 및 저판 받침대 사이의 마찰에 의한 구속력을 없애기 위해 덮개 및 저판면에 합성수지 Lucite를 부착하고 이 Lucite에 실리콘 그리이스를 바른다. 이는 재하판과 공시체 사이의 마찰력이 발생하는 것을 억제하고 공시체 내의 변형(또는 응력)이 균일하게 분포되도록 하기 위해서이다.

이어서 정위치된 공시체의 상·하단에 Membrane을 씌운 후 O-ring으로 봉한다. 다음에는 시료안에 있는 증류수의 누수를 방지하기 위해서 고무막 주위에 생 고무액을 바른다. 그리고  $\epsilon_3$  측정장치(clip gage)와 수평재하 장치를 설치한 후 삼축실을 조립하고 삼축실 내에 물을 채워 수압을 가한다. 시료를 충분히 포화시키기 위해, CO<sub>2</sub>를 하부배수관으로 유입시켜 배수관 및 시료와 멤브레인 사이의 공기를 상부 배수관을 통해 완전히 빠져나가게 한 다음 증류수를 하부배수관으로 유입시켜 CO<sub>2</sub>를 상부배수관으로 천천히 밀어 올린다. 이렇게 하는 이유는 CO<sub>2</sub> 가스의 체적변화는 순수 물(증류수)의 체적변화와 같기 때문에 상·하부 덮개 안과 시료와 멤브레인 사이에 소량의 CO<sub>2</sub>가 남아 있어도 물에 용해되어 크게 문제되지 않는다. 특히 사질토에서는 불가결의 처리방법이다.

또한 중간주응력 제어 시험에서는 중간주응력 제어용 피스톤에 비압축성 오일을 충만시킨 후 이 유압으로부터 단면보정을 통한 중간주응력 계수( $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ )를 정한 후 이 계수에 따라서 중간주응력을 조정한다. 한편 평면변형률 시험을 할때는 중간주응력 방향의 변형( $\epsilon_2$ )은 외부에 설치된 디지털 읽음 장치의 변형의 읽음값의 변화를 없도록 중간주응력

( $\sigma_2$ )을 조정하면서 시험을 진행한다.

### 2.4 시험내용

본 실험에서는 표-2에서와 같이 정규압밀 시료를 각각 1, 2, 3, 5kgf/cm<sup>2</sup>의 등방 응력으로 압밀하고 비배수 전단시험을 한다.

Table2. Test of Summary

구분 시험종류	구속응력 $\sigma_3$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	압밀배수조건
등방압밀 시험	1~5	압밀 배수시험
압밀비배수 시험	1, 2, 3, 5	압밀 비배수시험
평면변형률 시험	1, 2, 3, 5	압밀 비배수시험

본 연구에 사용된 시료의 크기는 언급한 바와 같이 7.6cm의 직방체이고, 단면적은 57.8cm<sup>2</sup>, 체적이 439cm<sup>3</sup>이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 등방압밀 시험

토조에서 압밀 재생성한 시료에 대해서 구속 응력( $\sigma_3$ )을 1, 2, 3, 4, 5kgf/cm<sup>2</sup>으로 증가시키면서 각각 24시간씩 등방압밀하고 또한 같은 방법으로 팽윤시켜 체적변형률과의 관계를 나타내면 그림-7과 같다.

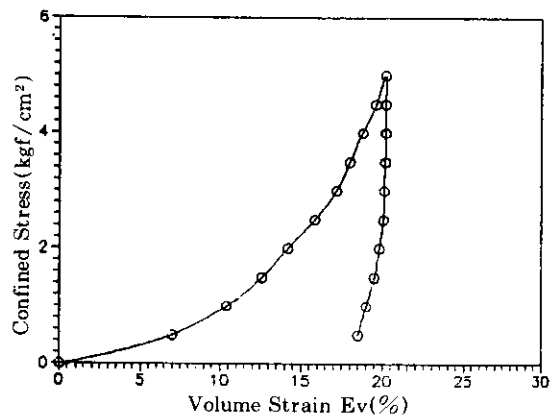


Fig.7 Isotropic consolidation test of cubical triaxial specimen

위 그림에 의하면 등방압밀 상태는 초기에 큰 체적변형률을 보이지만 높은 압밀응력에서

는 그 변화폭이 줄어들고 있으며 팽윤상태에서 초기의 소성회복이 거의 연직방향으로 일어나다가 구속응력을 2kgf/cm<sup>2</sup>으로 줄였을 때부터 토립자의 Collapse Strain의 영향으로 시료가 어느정도 소성회복을 하고 있다.

### 3.2 압밀비배수 삼축압축시험

성형 시료에 대하여 각각 1, 2, 3, 5kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 등방압밀하여 비배수 전단시험을 한 후 이에 대해서 축변형률( $\epsilon_1$ )에 대한 축차응력( $q$ )과 간극수압( $u$ )과의 관계를 각각 그림-8(a), (b)에 나타내었다.

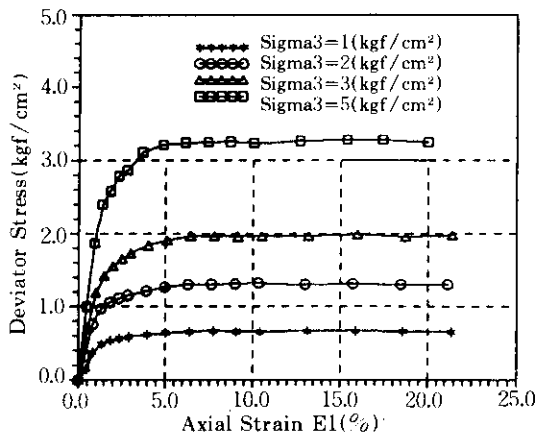


Fig.8 (a) Deviator stress( $q$ ) versus axial strain( $\epsilon_1$ ) curves

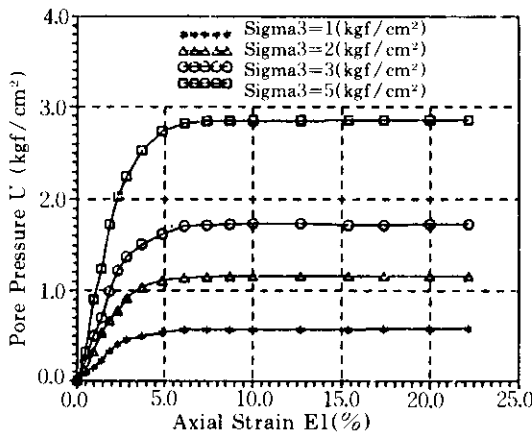


Fig.8 (b) Pore pressure( $u$ ) versus axial strain( $\epsilon_1$ ) curves

위 그림에서 구속응력이 증가함에 따라서 파

괴시(축차응력)의 축변형률이 증가하며 그 범위는 2~5% 정도로 비교적 적은 축변형률에서 파괴가 일어나고 있다. 한편 간극수압의 발생은 그림-9에서처럼 축변형률에 대해서 3~6%에서 최대값에 접근하고 구속응력을 기준으로 최대 축차응력과 초기 간극수압의 크기는 65%와 57% 정도로 나타난다.

### 3.3 평면변형률 시험

그림-9(a), (b)는 입방체 시료에 대한 평면 변형률 시험으로서 앞의 시험과 동일한 구속응력으로 시험을 하였으며, 축변형률( $\epsilon_1$ )에 대한 축차응력( $q$ )과 간극수압( $u$ )와의 관계를 각각 나타낸 것이다.

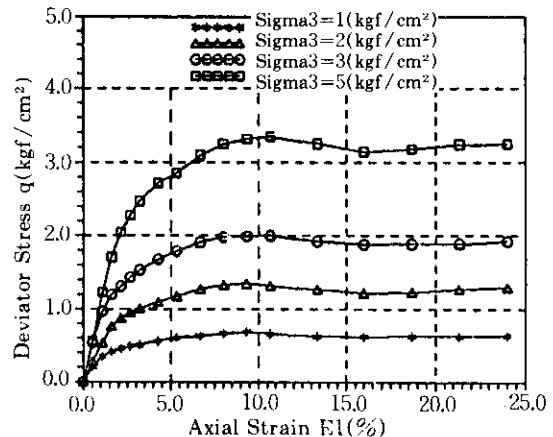


Fig.9 (a) Deviator stress( $q$ ) versus axial strain( $\epsilon_1$ ) curves of plane strain

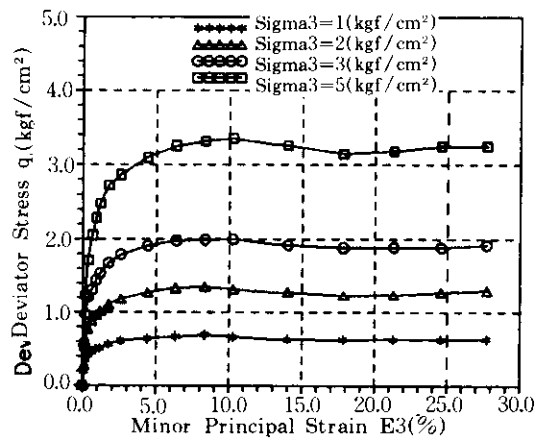


Fig.9 (b) Deviator stress( $q$ ) versus minor principal strain( $\epsilon_3$ ) curves of plane strain

2절에서 설명한 바와 같이 수평재하장치를 이용하여 평면변형률 조건( $\epsilon_2=0$ )으로 시험을 할 경우에는 앞에서 나타난 입방체 축대칭 시료보다 파괴까지의 변형률이 7~10%로 더 크게 발현되고 있다. 또한 파괴후에는 축변형률이 16% 정도에서 잔류응력이 일정한 값으로 수렴하고 있다. 최소주응력 방향의 변형률( $\epsilon_3$ )과 축차응력의 관계를 보면(그림-9(b)) 초기 부분에서 급격히 축차응력이 발생하고 있으며 파괴시의 변형률도 5~9%로 그림-9(a)와 비교해 보면 차이가 나고 있다.

이러한 결과로 부터 평면변형률 조건일 경우, 압밀비배수 삼축압축 시료와 비교해보면 파괴는 느리게 나타나며 최대축차응력은 약간 크게 나타나고, 항복 후의 축차응력이 어느정도 감소하다가 이후에는 일정하게 수렴한다.

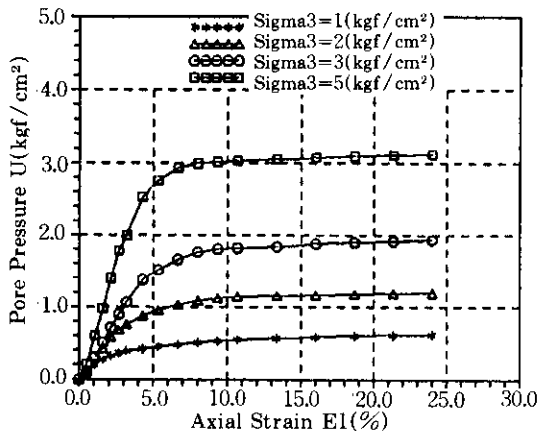


Fig.9 (c) Pore pressure(u) versus axial strain( $\epsilon_1$ ) curves of plane strain

그림-9(c), (d)는 간극수압과 변형률과의 관계를 나타낸 것으로 앞의 축차응력과 변형률 관계와 마찬가지로 간극수압은 축변형률( $\epsilon_1$ )이 5~8%정도에서 항복이 일어나며 최소주응력 방향의 변형률( $\epsilon_2$ )은 2~4%일때 항복에 도달한다. 항복후에도 변형률이 증가함에 따라서 계속해서 증가하는 경향을 나타내며 입방체 CU 시험 보다는 약간 크게 나타난다. 평면변형률 시험에 대한 간극수압 측정에는 축차응력을 가하는데 있어서 수평재하장치의 조정에 따라 간극

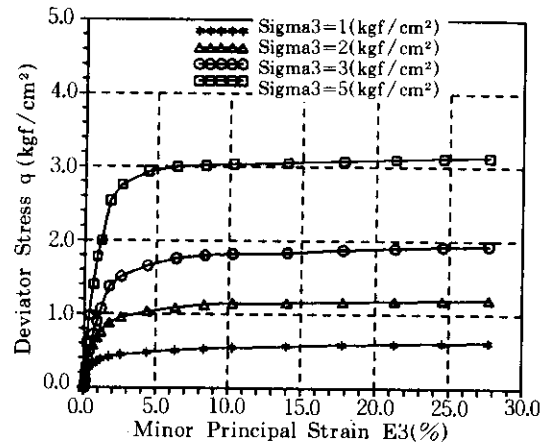


Fig.9 (d) Pore pressure(u) versus minor principal strain( $\epsilon_3$ ) curves of plane strain 수압에 차이가 있어 문제점으로 이번 에 지적되고 있다.

한편 그림-9(e)는 중간축차응력( $\sigma_2-\sigma_3$ )과 축변형률( $\epsilon_1$ )의 관계를 나타냈다. 이를 바탕으로 중간주응력계수  $b=0.38$ 인 상태가 본 연구에 사용된 평면변형률 조건임을 알 수 있으며 구속응력의 26%정도 발현하고 있다.

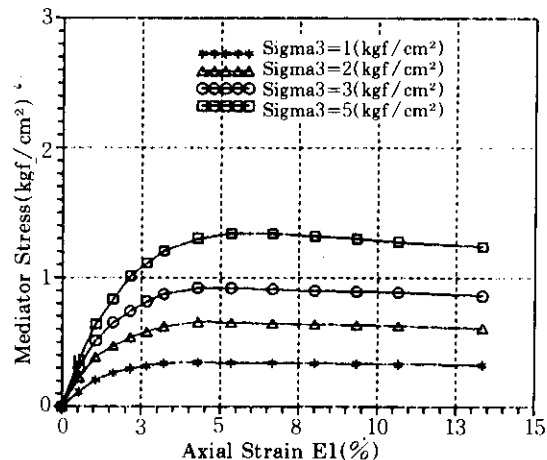


Fig.9 (e) Mediator stress( $\sigma_2-\sigma_3$ ) versus axial strain( $\epsilon_1$ ) of plane strain

### 3.4 입방체에 대한 압밀비배수삼축압축 및 평면변형률 시험의 비교

그림-10(a)는 입방체형 축대칭 시험과 평면변형률 시험결과를 축차응력(q)과 축변형률( $\epsilon_1$ )의 관계를 구속응력이 3kgf/cm<sup>2</sup> 일 때를



대표적으로(다른 구속응력일 경우도 거의 동일한 결과를 나타낸다) 나타낸 것이다. 그림 10(b)는 간극수압과 축변형률의 관계를 구속응력이 3kgf/cm<sup>2</sup>일 때를 나타낸 것이다.

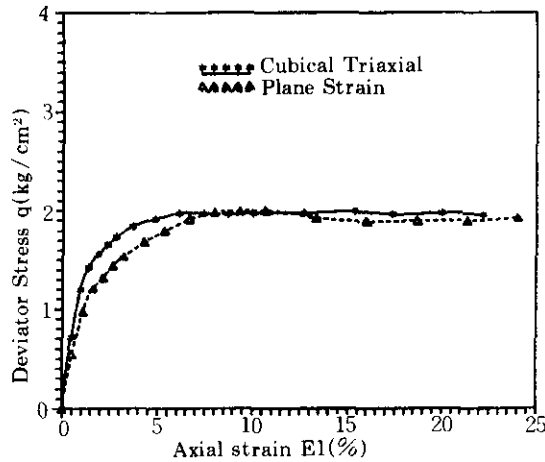


Fig. 10 (a) Deviator stress( $q$ ) versus axial strain( $\epsilon_1$ ) of cubical triaxial test ( $\sigma_3=3\text{kgf/cm}^2$ )

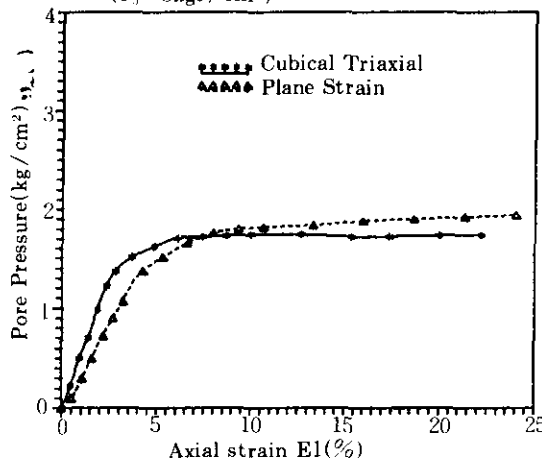


Fig. 10 (b) Pore pressure( $u$ ) versus axial strain ( $\epsilon_1$ ) of cubical triaxial test ( $\sigma_3=3\text{kgf/cm}^2$ )

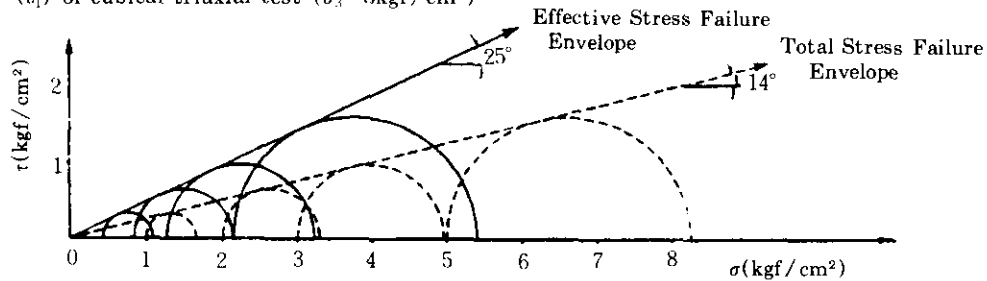


Fig. 11 (a) Mohr's circle of cubical triaxial specimen

Table 3. Results of Tests ( $\sigma_3=3\text{kgf/cm}^2$ )

내용 시험	최대축차응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	최대간극수압 (kgf/cm <sup>2</sup> )	최대축차응력시 축변형률(%)	최대간극수압시 축변형률(%)
양밀배수 시험	2	1.7	5	6
평면변형률 시험	2.1	1.8	9	8

최근의 연구 결과에 의하면 중간주응력이 점성토 및 입상토에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.<sup>7)</sup> 본 연구에서도 중간주응력이 고려된 평면변형률 시험일 경우  $\overline{CU}$  Test에서 축차응력이나 간극수압의 거동에서는 약간씩 차이가 나타나고 있고 파괴까지의 변형률이 더 크게 나타나는 경향이 보인다. 그러나 특징적이라고 보기에는 더 많은 실험이 필요하다.

#### 4. 응력경로와 한계상태

응력-변형 과정에서 응력의 증가와 더불어 파괴에 이르기까지 작용하는 응력변화의 궤적인 응력경로는 전단과정을 살피는데 중요하다. 여기서는 통상의 Mohr원 표현과 Lambe (1967)에 의한 방법으로 분석하면 다음과 같다.

##### 4.1 Mohr원

축차응력( $\Delta\sigma=\sigma_1-\sigma_3$ )이 시료에 작용할 때, 시료내에는 간극수압의 변화가 일어나므로 이 때 최대 및 최소 유효주응력은 다음과 같으며

$$\text{최소 유효주응력} : \sigma'_3 = \sigma_3 - \Delta u$$

$$\text{최대 유효주응력} : \sigma'_1 = \sigma_1 - \Delta u$$

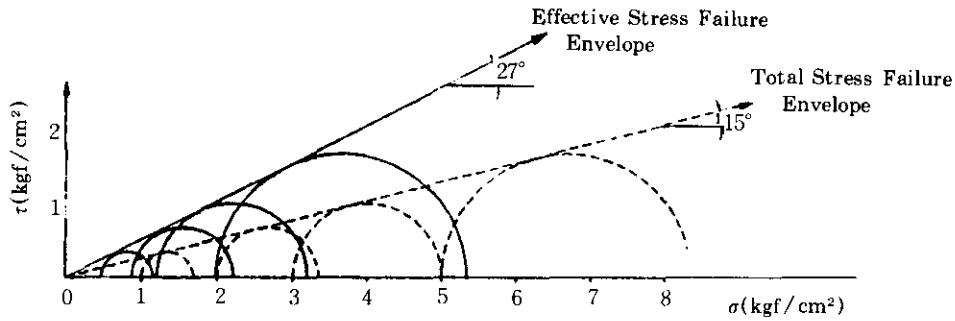


Fig.11 (b) Mohr's circle of plane strain specimen

이들 결과를 Mohr원으로 그리면 그림-11 (a), (b)와 같다.

각 실험에 대한 내부 마찰각과 점착력은 표-4와 같다.

Table 4. Parameters due to various tests (Mohr's Circle)

시험	배개변수 전응력 파괴포락 선에 대한 내부 마찰각 ( $\phi_{(cu)}$ )	유효응력 파괴포락 선에 대한 내부 마찰각 ( $\phi'$ )	점착력 $c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
압밀비배수 시험	14°	25.2°	0
평면변형률 시험	14.8°	27.5°	0

#### 4.2 유효응력(Lambe 방법)

유효응력 경로는 압밀비배수 삼축시험인 경우는 종축에 축차응력  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ , 횡축에  $p' = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3$ 로 하고 평면변형률 시험인 경우에는  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ,  $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) / 3$ 로 나타낸다.

한편 유효응력 경로는 그림-12에서 보는 바와 같이 간극수압계수 ( $A = \Delta u / \Delta \sigma$ )에 따라 그 방향이 결정되며

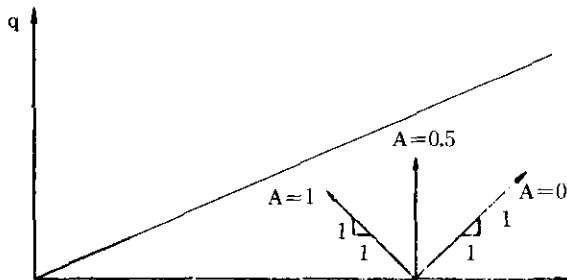


Fig.12 Dependence of effective stress paths on pore pressure parameter A

일반적으로 Skempton의 간극수압계수 A는 정규압밀점토에서는 0.5~1이며 과압밀점토에서는 -0.5~0 사이가 된다.<sup>13)</sup> 본 실험에서의 간극수압계수(A)는 입방체시료는 0.85~0.89, 평면변형률조건일 경우는 0.87~0.90 사이이다. 본 논문에 사용된 무안점토는 정규압밀점토임을 알 수가 있고, 각 시험에 대한 응력경로를 그림-13에 나타낸다.

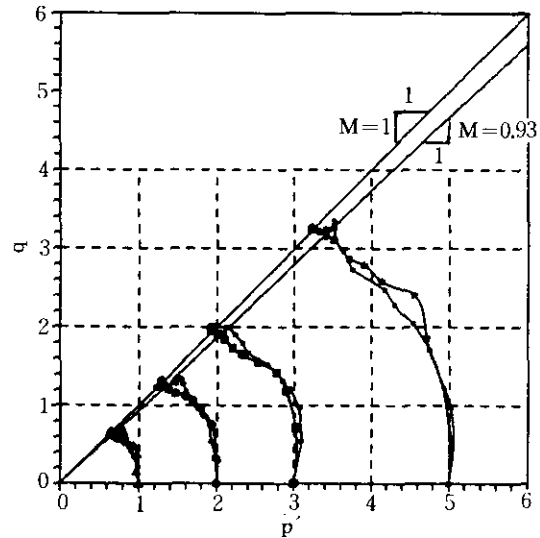


Fig.13 Stress paths of cubical triaxial specimens

위의 결과에 의하면 각각의 구속응력상태에서 출발하는 응력경로는 입방체형 축대칭시료는 기하학적으로 거의 유사한 형태를 나타낸다. 그렇지만 평면변형률 조건에서는 초기부분(축변형률 2%근방)에는 다른 형태를 보이며 이는 평면변형률 시험에 대한 초기 재하부분의

시험상 발생하는 문제점으로 볼 수 있다. 또한 각 응력경로의 끝점을 연결한 CSL(critical state line)의 기울기  $M$ 은 입방체 시료는 1.0, 평면변형률 조건에서는 0.93정도이다. 중간주응력이 고려된 평면변형률 시험이 약간 작게 나타난다.

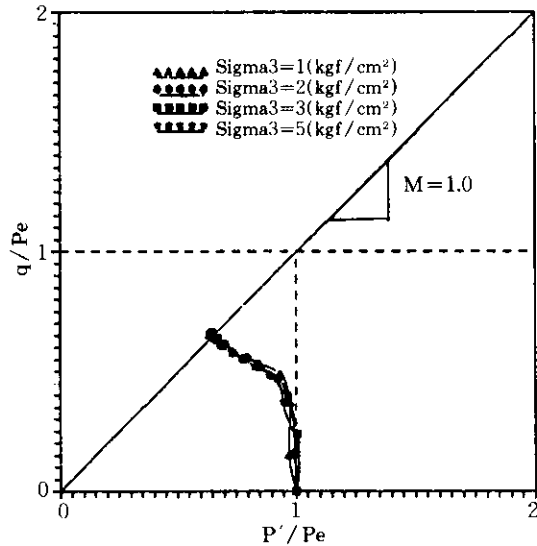


Fig.14 (a) Normalized stress paths of cubical triaxial specimens

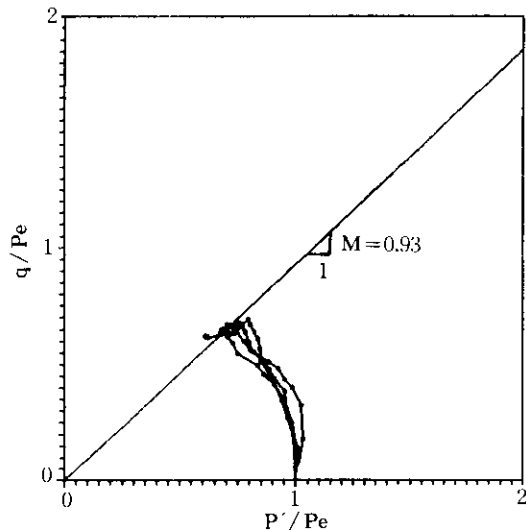


Fig.14 (b) Normalized stress paths of plane strain specimens

그림-14(a), (b)는 각 응력경로를 표준화한 것으로 이와 같이 표준화하는 이유는 서로

다른 구속응력 상태에서 응력경로가 발생하여 CSL에 이르는 곡면에 투영한 Roscoe면이 유일하게 존재하는 것을 증명하는 것이다. 즉 Roscoe면에서는 전단시의 배수조건에 관계없이 각자의 응력경로를 따라서 CSL에 이르게 되는데 이런 응력경로를 포함하는 곡면이 한 곡선으로 표현된다는 것을 알 수 있으며 또한 항복면이 선형압밀하중에 관계없다는 것을 보여준다.<sup>3,6)</sup>

규준화에 필요한 규준식은 각각의 평균등가응력( $P_e$ , mean equivalent stress)으로  $P'$ (유효수직응)와  $q$ (축차응력)를 나눈 식이다. 평균등가응력은  $P_e = P_0 \exp((e_0 - e) / \lambda)$ 로서  $P_e$ 와  $e_0$ 는 각각 압밀응력(구속응력,  $\sigma_3$ )과 이 때의 초기 간극비이며  $\lambda$ 는 정규압밀곡선의 기울기이다. 본 실험에서는 비배수 상태에서의 시험이므로  $e = e_0$  되며 결국  $P_e = P_0$ 가 된다. 즉 각각의 구속응력( $\sigma_3$ )이 평균등가응력이 된다.<sup>11,13)</sup> 입방체형 축대칭 시료는 거의 동일한 곡면으로 일치하는 반면 평면변형률조건일 경우는 분산되어 나타난다. 이는 실험상의 오차로 중간주응력의 제어가 빠르게 일어나지 않기 때문이며 이러한 현상들은 다음절에서도 나타난다.

### 4.3 한계상태

일반적으로 하중을 받고 있는 상태에서 흙이 전단파괴가 일어나며 주응력비 ( $\eta = q/P'$ )가 일정한 값이 되며 이 때 유효응력과 체적의 변화없이 무한한 전단변형만 일어나는 상태를 한계상태<sup>3,5,6)</sup>라 하며 그림 15-(a)에 나타내었다.

위의 그림에 의하면 입방체 압밀비배수 삼축 압축시료는 동일한 곡면을 이루면서 전단파괴 후 주응력비가 일정하게 되는 반면 평면변형률 조건일 경우는 곡면이 일정하지 않고 전단파괴 후에도 어느 정도 증가하고 있다.

그림-15(b)는 유효수직주응력( $P'$ , mean principal stress)을 규준화 시킨것이다.

위의 그림도 전술한 바와 같이 전단파괴 후 입방체형 압밀비배수 시험은 일정한 값으로 수

럼되지만 평면변형률 조건일 경우는 다소 분산되어 나타난다.

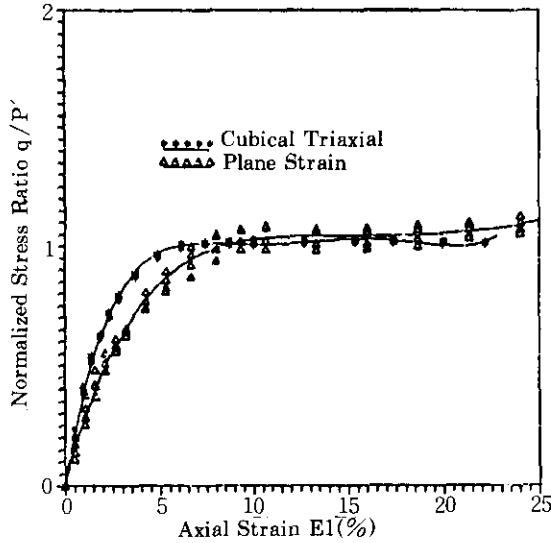


Fig.15 (a) Plot for stress ration( $\eta$ ) versus axial strain( $\epsilon_1$ ) of triaxial tests

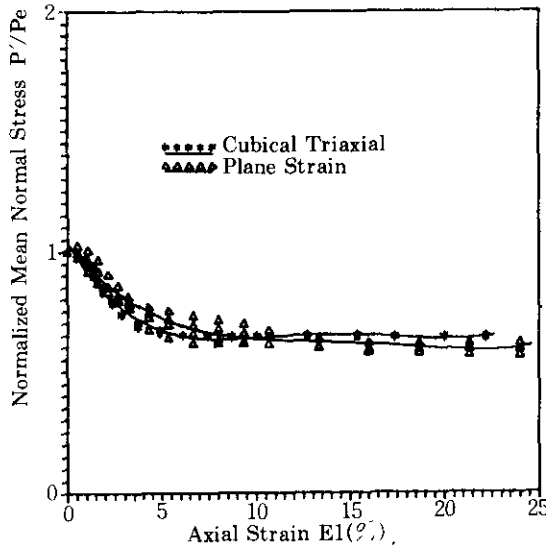


Fig.15 (b) Normalized for mean normal principal stress( $P'$ ) versus axial strain( $\epsilon_1$ ) of triaxial

## 5. 결 론

본 연구는 중간주응력 제어시험을 할 수 있는 Lade형 삼축시험기를 국내에서 개량제작하여 압밀비배수 삼축압축시험과 평면변형률 시

험을 통해서 각각 응력의 거동과 간극수압의 양상 그리고 각 시험에 대한 응력경로, 한계상태를 비교한 것으로서 본시험기의 성능과 정밀성을 검토한 것이며 위 시험을 통해 다음과 같은 점이 요약된다.

1. 평면변형률 시험을 통한 중간주응력의 거동이 응력경로 및 한계상태선에 영향을 미친다는 것을 잘알려져 있는데 본시험기를 사용하여 시험한 결과도 평면변형률 조건일 때가 입방체형 압밀비배수시험보다 강도는 약간 크고 파괴까지 이르는 변형률은 증가한다.
2. 입방체 평면변형률 조건의 시험인 경우에는 중간주응력 장치를 조정하는 수평재하 장치에 대한 정확한 제어와 이 때 감지되는 응력의 재빠른 반응이 관건이다. 이점이 더 정밀하게 개량되어야 축변형과 중간주응력 작용에 대해서 더 정확히 논의 될 것으로 보며 앞으로 개선되어야 할 과제라고 본다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 우수연구센터 후속조치(1991~1993) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 강권수,(1992) "입방체 삼축시험기의 시험제작," 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), 대한토목학회.
2. 박병기,(1990) "압축성 모래의 3차원 전단강도 특성," 한국지반공학학회, 제 6권 3호, 한국지반공학학회.
3. 박병기,(1991) "탄소성 구성식을 통해서 본 흙의 항복곡면," 한국지반공학학회 초청 강연집.
4. 임성철,(1992), "기초지반의 탄소성 변형해석", 전남대학교 대학원 박사학위 논문, pp.7~22.
5. 정종범(1994), "점토에 대한 축대칭 및 중간주응력 제어시험에 의한 응력-변형의 기초 연구," 전남대학교 대학원 석사학위논문.
6. 정진섭(1983), "포화점토의 응력-변형률에 관한 연구," 전남대학교 대학원 박사학위 논문.

7. 홍원표(1988), "중간주응력이 과압밀 점토에 미치는 영향," 대한토목학회 논문집, 제8권 2호.
8. Jacobsen, M(1967), "The Undrained Shear Strength of Preconsolidated Boulder Clay," Proc. Geot. Conf., Oslo, Vol.1, pp.119~122.
9. Lade, P.V.(1972), "The Stress-Strain and Strength Characteristics of Soils," Thesis Presented to the University of California, at Berkeley, Calif., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
10. Lade, P.V. and Duncan, J.M.(1973), "Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil." Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.99, No. SM10, Proc, Paper 10057, Oct., pp.793~812.
11. Lade, P.V. and Duncan, J.M.(1975), "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil," J.Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol, 101, No. GT10, Oct. pp. 1037~1053.
12. Lade, P.V.(1977),: "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surface." International Journal Soil and Structs. 13. pp.1019~1035.
13. Lade, P.V.(1978), "Cubical Triaxial Apparatus for Soil Testing," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol 1, No. 2, pp.93~101.

(접수일자 1994. 3. 15)