

# 구성식을 이용한 다짐화강토의 공학적 특성(1)

Constitutive Characteristics of Decomposed Korean Granites(1)

김 용 진\*<sup>1</sup>  
Kim, Yong-Jin  
이 인 모\*<sup>2</sup>  
Lee, In-Mo  
이 인 근\*<sup>3</sup>  
Lee, In-Keun

---

## Abstract

Decomposed granite soil is a typical residual soil in Korea originated from Granite or Granitic Gneiss, and it is a construction material encountered most frequently in the Korean peninsula. It is known as a problematic soil because the strength characteristics is changed significantly when it is exposed to air and mixed or contacted with water. The aim of this study is to evaluate its strength characteristics and to examine the applicability of the constitutive laws.

Firstly, triaxial tests were performed on two different soils from Andong and Kimchun sites prepared by the laboratory compaction. The CID, CIU tests were conducted to scrutinized the characteristics of the strength and the consolidation. The experimental results were analyzed and the parameters related to the Modified Cam-Clay Model were evaluated. Finally, the predicted behavior was compared with the observed one.

Even though the origins of Andong and Kimchun soils are different, there was only slight difference in the angle of shear resistance( $\phi'$ ) and in the slope of the virgin compression line( $\lambda$ ): both soils showed almost the same characteristics practically.

In the effective mean normal stress and the specific volume space, it was conformed the uniqueness of the Normal Compression Line(NCL) and the Critical State Line(CSL).

The relationships between the stress or the effective stress ratio and the axial strain for the decomposed granite soil were different from those of typical sand or clay. When the OCR is larger than 2, the stress-strain relationship did not show the maximum deviatoric stress(MDS) or  $\eta'_{max}$ , even though  $\eta'$  itself converged to the Critical State. The stress path moved below the theoretical Roscoe surface; however, when using the MDS parameters, it was found to coincide with the observed one. In undrained tests of Normally consolidated

---

\*<sup>1</sup> 정회원, 삼우기술단 지반공학부 이사

\*<sup>2</sup> 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

\*<sup>3</sup> 정회원, 서울특별시 용산구청 건설국장

(NC) soils, the pore pressure parameter,  $A_v$ , increased up to 1.3. This phenomenon might be mainly due to the effect of the particle crushing during shearing. When the OCR value approaches 7, the negative pore pressure is developed in undrained tests and the dilatancy is observed in drained tests.

The predicted and the observed behavior of drained tests showed relatively good fitting with the Cam-Clay model.

## 요 지

풍화화강토는 화강암이나 화강편마암이 풍화된 흙으로 건설현장에서 빈번하게 접하고 있는 우리나라의 대표적인 토질이며, 공기에 노출되거나 물과 접촉하면 강도특성이 쉽게 변화하는 문제성이 많은 토질로 알려져 있다. 이 연구에서는 이러한 풍화화강토의 역학적특성을 파악하기 위하여 기원과 구성성분이 다른 안동과 김천에서 풍화화강토를 채취하여 실내다짐에 의하여 공시체를 제작한 후에 등방압밀배수 및 비배수시험을 실시하였으며, 시험결과를 분석하여 여러가지의 강도특성을 분석하고 Cam-Clay모델에의 적용성을 검토하였다.

안동과 김천시료의 기원은 상이하지만 전단저항각과 압축특성은 실용적으로 동일하였다. 비체적대 평균유효응력공간에서 정규압축곡선과 한계상태선이 유일한 것으로 나타났으며 응력-변형률 거동특성은 점성토나 모래의 특성과는 다르게 나타났다. 과압밀비가 2이상일 경우에 유효응력비가 한계상태에 수렴하였지만 응력-변형률 관계에서 최대응력이 나타나지 않았다. 응력경로는 이론적인 Roscoe면 아래로 이동하면서 한계상태에 접근하였다. 정규압밀비배수시험에서 간극수압계수( $A_v$ )는 1.3 정도이었는데 이것은 전단중에 발생하는 입자파쇄현상에 의한 것으로 판단되었다. 과압밀비가 7정도에서 부(-)의 간극수압과 체적팽창현상이 발생하였다. 구성식에 의하여 실측치와 이론치를 비교한 결과, 배수거동에서는 만족할만한 결과를 구할 수 있었다.

## 1. 서 론

풍화화강토는 우리나라 국토의 2/3 이상을 차지하고 있는 화강암, 화강편마암 등이 원지반에서 풍화된 흙을 총칭하며 국토개발에 따라 도로건설, 간척, 댐건설, 원지반의 기초 등과 대도시의 근접시공에서 건설기술자가 많이 만나고 있는 건설재료이다.

우리나라의 지질학적 생성기원이 아주 복잡하듯이 풍화화강토 역시 복잡한 성격을 띠고 있는데, 풍화에 의한 특성변화와 구성입자의 변화특성이 지반기술자들에게 많은 문제를 야기하고 있다. 풍화화강토의 주된 1차광물은 석영, 운모, 장석이며 풍화가 진전될수록 구성광물과 안정성이 달라진다. 석영은 풍화가 되어

세립화가 이루어지면 비교적 안정한 구조가 되는데 비하여 운모와 장석은 세립화가 될 뿐 아니라 2차광물인 점토광물로 변화하여 물리적, 화학적으로 불안정한 성격을 소유하게 된다. 이러한 과정은 장기적인 현상이며, 건조시에는 마사토(일명 眞土)라고 불릴 정도로 강한 강성을 나타내고 있으나 공기에 노출되거나, 물과 접하면 강도가 급격히 저하되어 상당한 문제성이 있는 흙(problematic soil)으로 인식이 되고 있는 것과 같이 단기간에 발생하는 변화가 안정성에 미치는 영향이 공학적으로 매우 중요하다. 이러한 풍화화강토는 세계 곳곳에 분포되어 있으며 우리나라와 일본 및 홍콩등에서 이에 대한 연구가 이루어지고 있다. 우리나라에서는 1960년대 이후로 이에 대한 연구가 부분적으로 진행되어 왔으나 건설재료로 사용되

는 빈도나 중요성에 비하여 풍화화강토의 공학적인 특성을 체계적으로 정리하고자 하는 노력은 이루어지지 않고 있다. 특히 실무에서 풍화화강토의 강도정수를 선정할 때에 전단저항각이나 점착력 등이 시공조건 등에 대한 특성을 고려하지 않고 천편일률적으로 사용되고 있는 실정이므로 이에 적합한 공학적인 정의와 특성 연구가 수행되어야 한다. 그러므로, 이 연구에서는 삼축압축시험을 수행하여 풍화화강토의 강도 및 압축특성을 구하여 각종 설계정수들을 분석하여 풍화화강토에 대한 연구의 중요성을 제시할 뿐만 아니라 설계에 유용한 자료를 제공하고 이들을 사용하여 풍화화강토의 거동을 Cam-Clay모델의 구성식에 적용할 때의 타당성을 파악하고자 한다.

## 2. 시험장비 및 시험

### 2.1 시험장비

시험에 사용된 장비는 C. K. Chan 등<sup>(5, 6)</sup>에 의해 개발된 동적삼축기구(an automated triaxial testing system: C.K.C type)이며, • B값 측정 및 배압, • 등방 및 K.압밀, • 재래식 삼축압축, • Cyclic 및 Dynamic, • 응력경로 (stress path), • Constant-p, • Creep 과 응력 이완 (stress relaxation) 시험 등을 할 수 있으며, 시험조건에 따라 재하대 (loading frame) 에 Oil-Actuator나 Air-Actuator를 교체하여 응력 및 변위제어의 2가지 시험으로 전환시킬 수 있다.

시험장비는 그림 1과 같이 3개 부분으로 구성되어 있으며 압력은 압축공기를 사용한다.

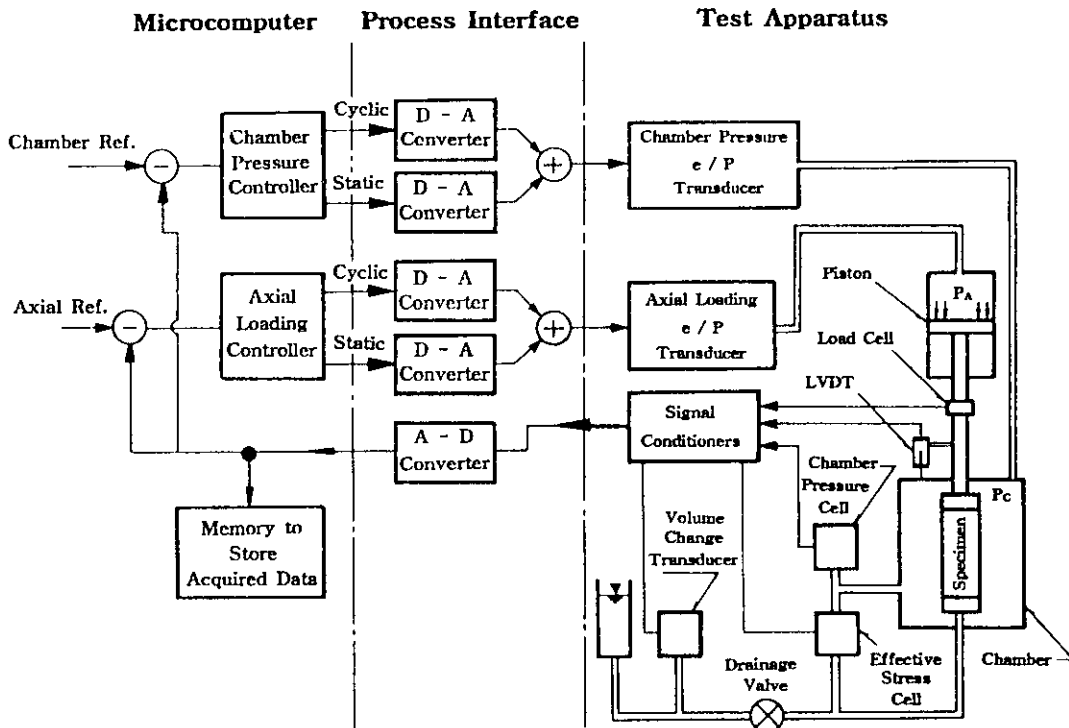


그림 1. C.K.C-type 삼축시험기의 계통도

## 2.2 사용시료의 일반적인 특성

시험에 사용한 시료는 기원 구성성분의 차이에 의한 거동특성을 분석하기 위하여 경상북도 안동군 임하동 지역에 건설중인 부댐과 김천시 제 2공단내 Lucky Fiber Plant 지역에서 채취하였다. 안동시료의 지질형태는 시대미상(age unknown)의 안동 화강암 지대로 조립질이며, 김천시료는 원지반이 선캄브리아기의 편마암 복합체(gneiss complex)지역에서 채취한 조립질이다.

이들의 물리적 및 다짐특성은 표 1과 같으며 입도분포는 그림 2와 같다.

표 1. 풍화화강토의 특성

	안 동	김 천
G <sub>s</sub>	2.66	2.66
액소성	NP	NP
통일분류	SM	SM
#200체 통과량	14%	17%
OMC	12.2%	11.0%
$\gamma_{dmax}$	1.945 t/m <sup>3</sup>	1.85 t/m <sup>3</sup>

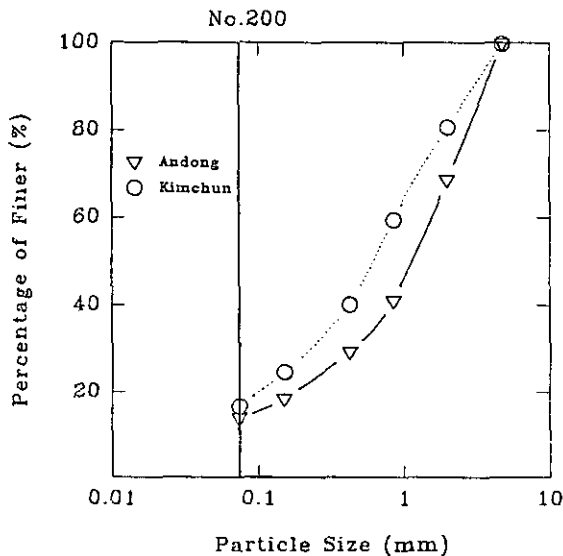


그림 2. 시료의 입도분포 곡선

## 2.3 시료의 제작과 시험

삼축시험은 현장조건과 거의 유사한 상태를

재현시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 시험 중에 인위적인 오차가 발생하며 이를 줄이기 위한 연구가 다방면으로 진행되어 왔었다. 그 중 풍화화강토에 대한 연구도 수행되었으며 Lee<sup>(12)</sup>에 의하면 풍화화강토와 같은 입상토에서 고려하여야 할 요인중 시료의 크기, 단부의 구속조건, 멤브레인 관입효과, 배수조건과 재하율 등이 중요하다고 한다. 이들에 의한 영향을 최소화하기 위하여 다음과 같이 공시체를 제작하여 시험하였다.

1) 공시체의 직경은 ASTM<sup>(1)</sup>, BS<sup>(4)</sup>, JS-SMFE<sup>(8)</sup> 등의 규정을 적용하여, 현장채취후 4번 체를 통과한 시료를 선정하였으므로 최대입경 4.76mm의 10배 정도가 적합하므로  $\Phi 50mm$ 로 선정하였다.

2) 단부구속조건은 단부(상부 cap과 하부 base)와 시료 사이에 발생하는 마찰저항을 최소화하기 위하여 단부와 시료 사이를 Silicon Grease 처리하는 것이 가장 효과적<sup>(18)</sup>이라고 하지만, 윤활층의 변형이 축변형과 체적변형에 미치는 영향 역시 무시할 수 없으며<sup>(19)</sup> 실제 본 시험에서 Grease를 사용했을 경우에 간극수압 측정용 1/8" Tube가 막히거나 Transducer에 영향을 끼쳐 Grease를 사용하지 않고 그림 3을

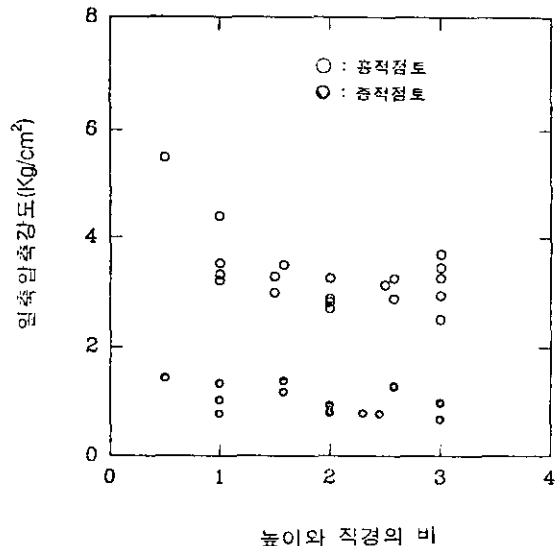


그림 3. 시료의 길이와 입경비에 대한 강도변화

참고하여 시료의 길이를 직경의 2.5배로 하여 단부구속효과를 최소화시켰다.

3) 시료제작방법이 전단강도와 변형특성에 미치는 영향이 크다는 것은 잘 알려져 있으며, 재생형시료인 경우에는 시료제작시 시료의 균일성을 확보하고 입도분리현상을 최소화하는 것이 최대의 목적이다. 일반적으로 시험의 목적에 따라 공기투사법, 물투사법, 진동, 습윤 및 건조복단층다짐법이 있으나 본연구에서는 시험기의 최대 압밀응력을 고려하고 정규압축곡선(normal compression line: NCL)의 존재를 확인하기 위하여 단층다짐법을 사용하였다. 즉, 안동 및 김천에서 채취한 시료를 자연건조시켜 입도가 고르게 분포되도록 잘 섞은 다음에 4분법에 의하여 건조단위중량이  $1.6g/cm^3$ 이 되도록 시료를 선정하였다. 여기에 함수비가 10% 되도록 물을 첨가하여 높이가 185mm, 직경이 50mm인 Stainless Steel Mold에 투사한 후 양쪽마개를 막고 손으로 눌러 시료를 제작한 후에 추출봉을 사용하여 추출하였다.

4) 포화: 포화토와 불포화토의 압밀 및 전단 거동이 매우 다르다. 특히 전단시 완전포화가 되지 않으면 간극수압이 작게 나타나므로 포화토의 거동과는 다른 형태를 나타낸다. 그러므로 시험 전에 B값을 1.0에 가깝게 만드는 것이 필요하며 일반적으로 점토인 경우에는 0.95 이상, 사질토인 경우에는 0.98 이상이 되도록 권하고 있다<sup>(6, 20)</sup>. 시료를 포화시키는 방법은 유수법(flushing with water)<sup>(3, 13)</sup>, 배압법(back pressure)<sup>(3)</sup>,  $CO_2$ <sup>(10)</sup>, 진공법(vacuum supply)<sup>(17)</sup> 등이 있으며, 일반적으로 배압법을 많이 사용하지만 배압법만을 사용할 경우 초기 포화도

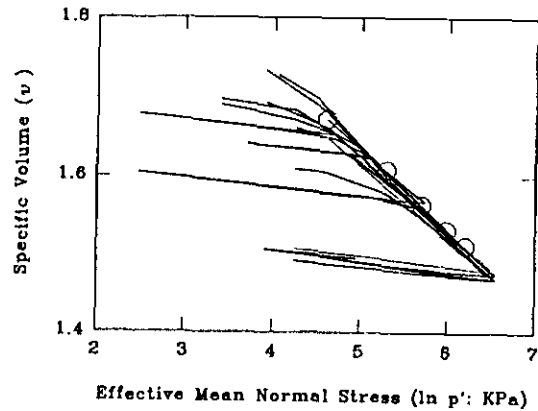
에 따라 완전포화시키기까지 소요되는 시간이 너무 길어서 본 시험에서는 진공법과 배압법을 동시에 사용하였다.

풍화화강토의 거동특성을 규명하기 위하여 시행한 시험종류 및 개수는 표 2와 같다.

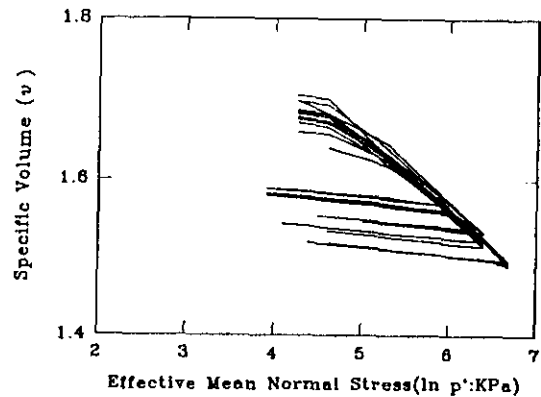
### 3. 시험결과 및 일반적인 거동특성

#### 3.1 압축특성

안동과 김천시료를 등방압밀시킨 결과는 그림 4와 같다. 그림 4 a)에서 원으로 나타낸 것은 NCL의 유일성을 검증하기 위하여 초기밀도를 달리하여 등방압밀시킨 결과이며, 100 KPa을 초과한 응력에서 NCL이 거의 일치하



a) Andong Sample



b) Kimchun Sample

그림 4.  $\ln p'-v$  곡선의 전체적인 경향

표 2. 시험종류와 개수

종 류	안 동	김 천	
등방압밀	정 규	12	11
비배수시험(CIU)	과압밀	4	13
	정 규	5	3
배수시험(CID)	과압밀	3	3

는 경향을 나타내었다. 이것은 Cam-Clay 모델의 기본조건인 NCL의 유일성을 증명하는 것이다. B값이 0.98 이상 되는 결과를 분석하면 안동시료의 NCL의 기울기  $\lambda$ 는 0.095에서 0.114 사이로 분포하고 있다. CIU시험에서 구한 최종압밀응력과 비체적인 관계를 그림 5 a)와 같이 그려 구한  $\lambda$ 값과 상관계수는 0.104와 0.993이었다. 김천시료는 그림 5 b)에서 구한  $\lambda$ 값과 상관계수는 0.097과 0.991이었다. 제하(unloading)부분인 팽창곡선(swelling line)의 기울기  $\kappa$ 를 그림 5에서 구하면 0.011이었다. 이값은 Murata 등<sup>(16)</sup>이 제시한 범위  $\lambda=0.04-0.2$ 와  $\kappa=0.008-0.02$ 의 범위에 들어가며 Lee<sup>(12)</sup>의 불암지역 풍화화강토와 비교하면  $\kappa$ 는 2배 정도 크지만  $\lambda$ 값은 유사하다.

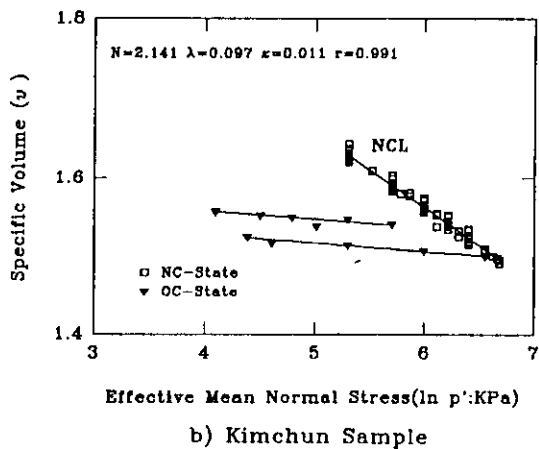
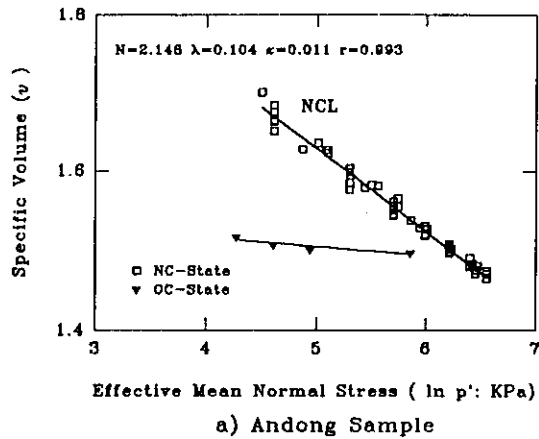


그림 5.  $\ln p'-v$  관계

압밀시험의 초기 5분 이내에 발생하는 체적 변형량이 표 3과 같이 80~90%가 발생하는 것은 투수성이 크다는 것을 나타내며, 1시간 이후에 발생하는 변형량은 평균 1% 이하이지만 계속적으로 압밀이 발생한다. Lee<sup>(12)</sup>와 Miura 등<sup>(15)</sup>에 의하면 압밀이 완료되는 소요시간은 350~750시간이며, 간극수압의 소산이 완료된 후에도 압밀이 계속되는 것은 점진적인 입자파쇄현상 때문이라고 하였다.

표 3. 초기변형량(평균)

시료명	측변형량	체적변형량
안동	80%	90%
김천	64%	80%

시험결과에서 구한  $\lambda$ 와  $\kappa$ 를 소성체적비(plastic strain ratio;  $A=1-\kappa/\lambda$ )로 나타내거나, 제하(unloading)시 발생한 소성변형량( $\epsilon^p$ )으로 나타내면 표 4와 같다.

표 4. 소성체적비와 소성변형량

평균	안동시료		김천시료		
	$\Lambda$	$\epsilon^p$	평균	$\Lambda$	$\epsilon^p$
	0.871	0.828		0.860	0.871

Ladd 등<sup>(9)</sup>과 Mayne 등<sup>(14)</sup>에 의하면  $\Lambda$ 는 각각 0.75~0.85와 0.78정도의 값이라고 하였으나 표 4에서 볼 수 있듯이 풍화화강토인 경우에는 평균 0.87에서 0.93까지이며 Lee<sup>(12)</sup>의 경우에는 0.944까지 보고되고 있다. 만일 표 3의 초기변형량이 탄성변형이라면  $\Lambda$ 나  $\epsilon^p$ 값이 작아야 하지만, 풍화화강토인 경우에 소성변형이 전체 변형량의 80% 이상 발생하며 소성변형률과 비교하여도 잘 일치하는데, 등방압밀시 발생하는 체적변형은 입자의 이동뿐만 아니라 입자파쇄 효과에 의해서도 발생하며 파쇄에 의한 변형량의 대부분이 소성변형에 의한 것임을 알 수 있다. 압밀시험 후 실시한 입도분석시험의 결과는 그림 6과 같다. 구속응력의 증가에 따라 입도분포가 달라지는 것은 입자의 파쇄가 크게 발생함을 알 수 있다.

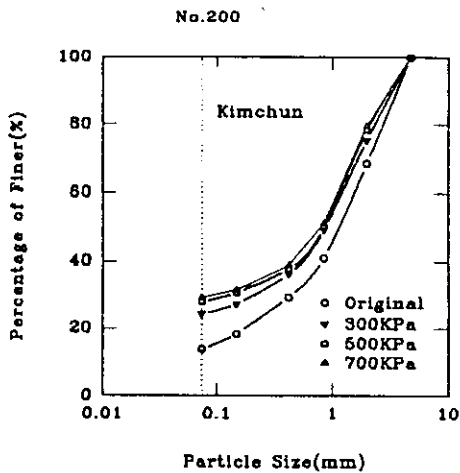
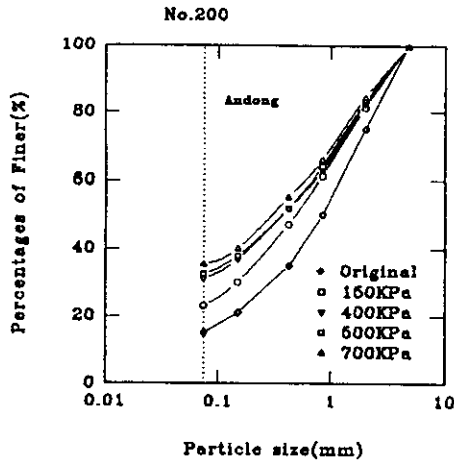


그림 6. 입자파쇄효과

### 3.2 전단특성

일반적으로 최대강도는 응력-변형률곡선에서 최대축차응력을 의미하지만<sup>(7)</sup>, 구성식에서의 최대강도는 유효응력비-변형률( $\eta'-\epsilon$ )곡선에서의 최대점인 최대유효응력비( $\eta'_{max}$ ) 개념을 사용하며, 본연구에서는 해석의 편의를 위하여 응력-변형률곡선에서의 최대축차응력을 MD S(maximum deviatoric stress)로 정의한다. 극한강도 역시 유효응력비개념으로 사용하며 이론적으로 배수시험과 비배수시험에서 각각 체적변화가 없거나, 유효응력의 변화가 없이 소성전단변형이 계속 발생하는 상태를 나타낸

다. 다만, 본연구에서는 실용적으로 Lee<sup>(12)</sup>가 사용한 “시험을 끝내기 전의 마지막 변형률 3%이내에서 배수시험인 경우 유효응력비의 변화( $d\eta'$ )가 0.03 이하이고 체적변형률 변화가 0.1% 이하일때, 비배수시험에는  $d\eta' \leq 0.03$  이고 간극수압의 변화가 5.0KPa 이하”인 규정을 사용하였다.

#### 1) 비배수 정규압밀시험(CIU-NC)

응력-변형률곡선은 초기밀도와 구속응력에 영향을 받는다는 것은 잘 알려져 있으며 풍화 화강토인 경우에도 동일한 영향을 받는다<sup>(12)</sup>. 본연구는 풍화화강토의 구성식에 의한 거동특성을 파악하는데 중점을 두었기 때문에 초기밀도의 영향을 정량적으로 파악하지 못했으나, 일반적으로 구속응력에 관계없이 응력-변형률곡선의 형태가 유사하게 나타났다. 즉 시료 제작시에 초기유효응력이 50-70KPa가 되도록 유지하며 포화시켰기 때문에 초기유효응력을 초과한 구속응력하의 거동특성은 거의 동일하였다.

풍화화강토의 CIU-NC 시험결과는 그림 7 및 8과 같다. 응력-변형률곡선은 그림 7과 같이 MDS와 극한강도가 어느정도 나타나고 있으나 MDS와 극한강도의 전이구간은 매우 완만하게 나타나고 있다. 1.8-2.2% 내에서 MDS가 나타난 후에 15% 정도까지의 강도의 변화는 안동인 경우에 30-50KPa, 김천인 경우에는 약 20KPa 정도의 차이를 나타내고 있다. 비배수시험 결과를 유효응력비에 의하여 나타내면 그림 8과 같이 미세하게 최대강도가 발생하며 변형이 계속될 수록 한 점에 수렴되는 현상을 보이고 있다. 유효응력비-변형률곡선에서 구속응력이나 초기밀도에 관계없이 변형이 증가할 수록 일정한 점에 수렴한다는 것은 풍화화강토에도 극한상태 즉 유일한 한계상태가 있는 것을 나타내고 있다.

정규압밀된 흙에서는 최대강도가 나타나지 않는 것으로 알려져 있으나 비배수시험 결과 최대강도가 발생하고 있으며 이러한 원인으로 는 한계상태에 도달한 후에도 입자파쇄에 의한

입자재배열이 계속 발생(turbulent motion)<sup>(2)</sup> 하는 복합적인 현상으로 볼 수 있다.

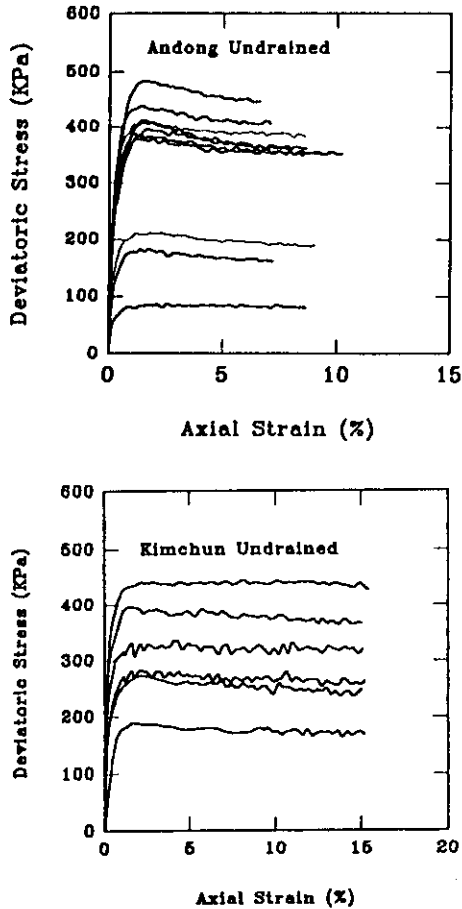


그림 7. 응력-변형률관계(NC, CIU 시험)

2) 비배수 과압밀시험(CIU-OC)

CIU-OC시험결과는 그림 9 및 10과 같다. 과압밀된 흙에서는 최대응력비에 도달한 후 한 계강도에 수렴하는 것이 일반적인 현상이다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 과압밀비가 낮은 경우(OCR=2, OCR=1.14)에는  $\sigma'-\epsilon$ 곡선상 MDS를 나타내고 있으나, 과압밀비가 큰 경우에는 오히려 MDS를 나타내지 않고 있다. 그림 10에는 응력비-변형률( $\eta'-\epsilon$ )을 나타내고 있으며, 최대강도와 극한강도의 차이가 거의 나타나지 않는 현상을 나타내고 있다. 이 그림에서 보면, 극한강도에 이르는 응력비는 일정

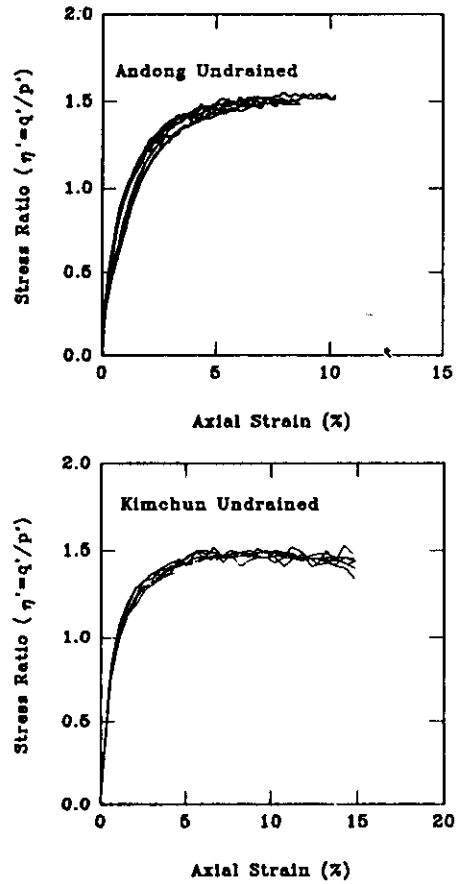


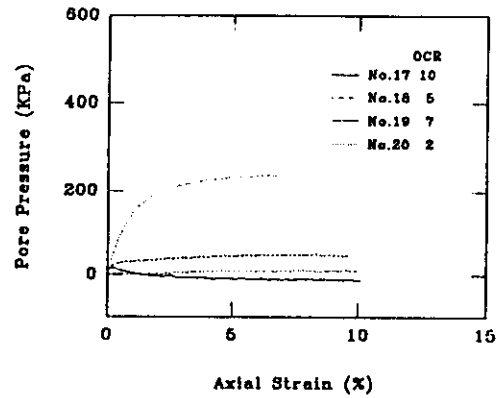
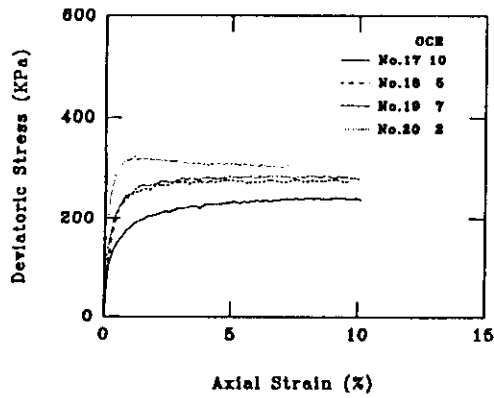
그림 8. 응력비-변형률관계(NC, CIU시험)

한 점에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 한편, 간극수압의 양상을 살펴보면 과압밀비에 따라 다소의 차이는 있으나 과압밀비가 5이상인 경우에는 부압(negative excess pore pressure)이 발생하였다.

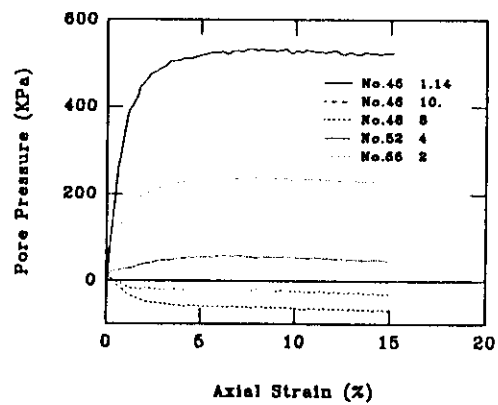
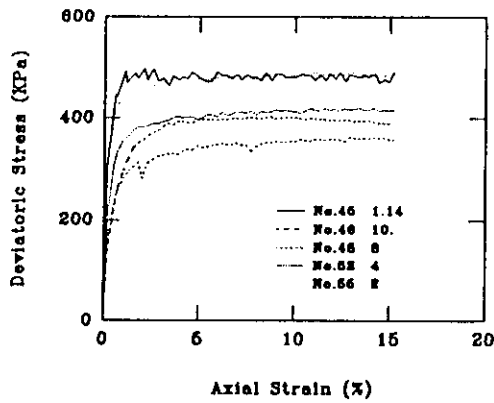
3) 압밀 배수 시험(CID)

정규압밀된 시료의 압밀배수(CID) 시험결과는 그림 11과 같으며 변형률 25% 이상에서 수렴하는 현상을 나타내고 있다. 비체적대 변형률 관계는 구속응력에 따라 시작점은 다르지만 변형률 증가에 따라 즉, 20%의 변형률 정도에서 체적변화율이 둔화되고 있다. 과압밀토의 압밀배수 시험결과는 그림 12와 같다. 그림 12에서 볼 수 있는 것과 같이 MDS가 나타나지 않고 10% 이상의 변형률이 지나면서 일정한





a) Andong (Max. Confining Stress:700KPa)



b) Kimchun (Max. Confining Stress:800KPa)

그림 9. 응력비-변형률관계(OC, CIU시험)

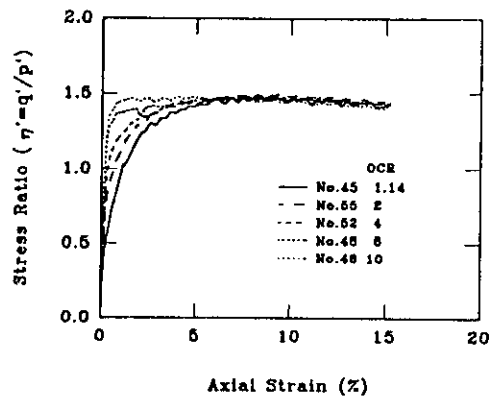
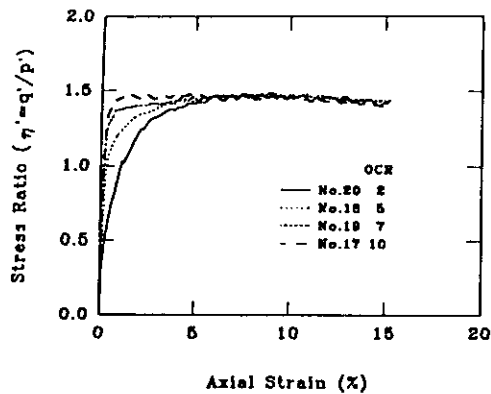
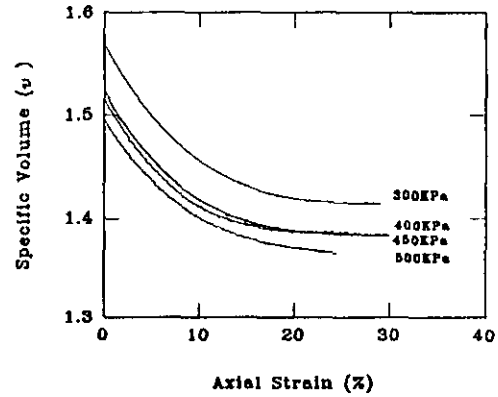
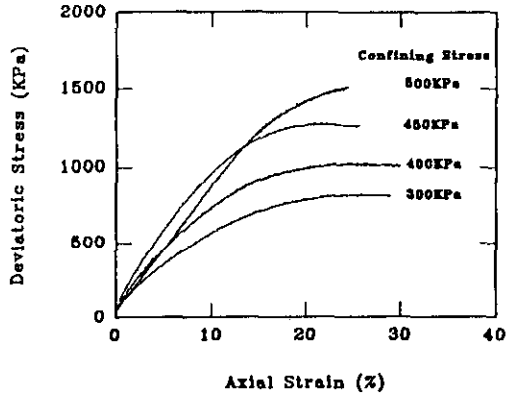


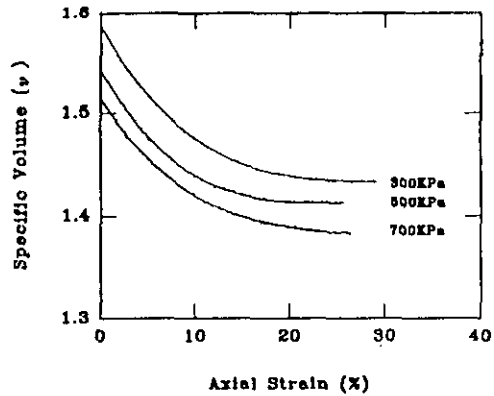
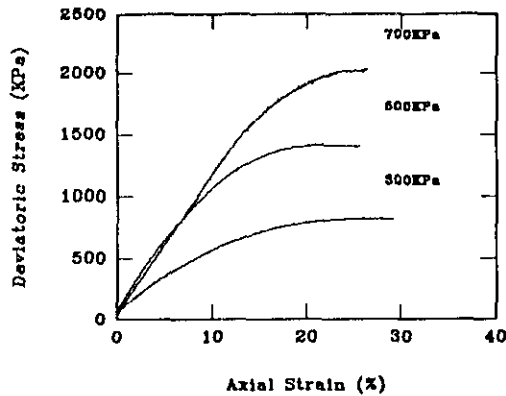
그림 10. 응력비-변형률관계(OC, CIU시험)

점에 수렴하고 있는 현상을 보이고 있다. 그림에서 보면 OCR이 6을 초과할 경우에 체적팽창 현상을 타나내었으며, 일반적으로 최대강도

가 발생하는 시료가 체적팽창을 수반하지만 본 시험결과와 체적팽창이 있는 시료에도 최대강도가 뚜렷하게 나타나지 않았다.



a) Andong Sample



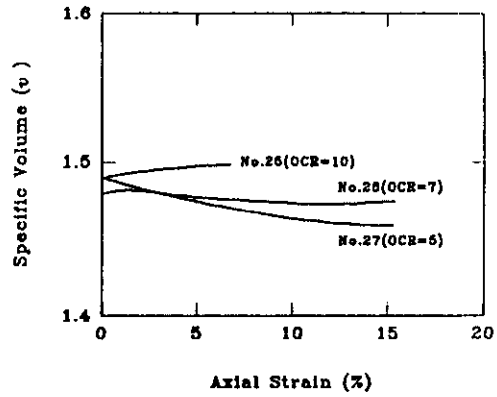
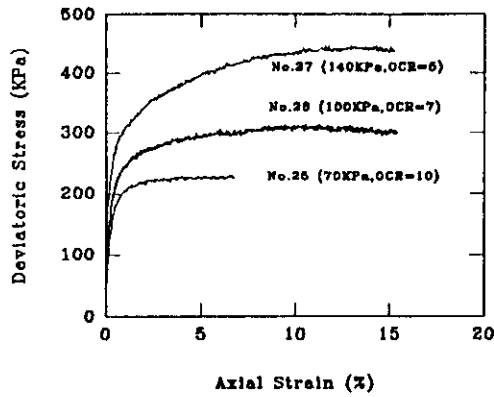
b) Kimchun Sample

그림 11. 응력 및 비체적-변형률관계 (NC, CID시험)

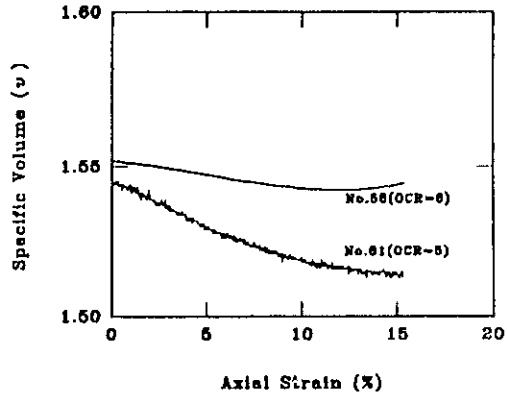
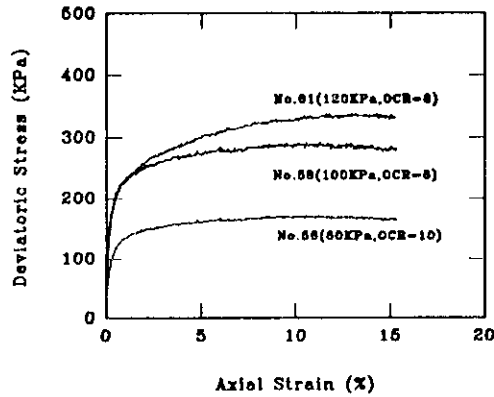
CID결과를 유효응력비로 나타내면 그림 13과 같다. 정규압밀과 과압밀시료 모두 변형률의 증가에 따라 일정한 응력비 즉, 안동과 김천 각각  $\eta' = 1.5$ 와  $1.45$  정도에 수렴하며 CIU시험에서와 같이 최대강도의 경향은 볼 수 없었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 시험결과를 MDS와 응력비로 각각 나타내었을 때 나타나는 양상이 어느정도 차이가 나며 통념적으로

알려져 있는 흙의 거동양상과 다르다는 것을 알 수 있었다. 즉, 시험결과를 유효응력비에 의하여 분석하면 과압밀비가 5 이상이어도 최대강도는 거의 나타나지 않으며 미세하게 나타나는 최대점 역시 최대강도비라고 정의하기 곤란하며, 일반적으로 과압밀된 흙에서 보이는 최대점과 함께 Softening 현상을 발견할 수 없었다.



a) Andong Sample



b) Kimchun Sample

그림 12. 응력 및 비체적-변형률관계 (OC, CID시험)

#### 4) 한계상태선(Critical State Line : CSL)

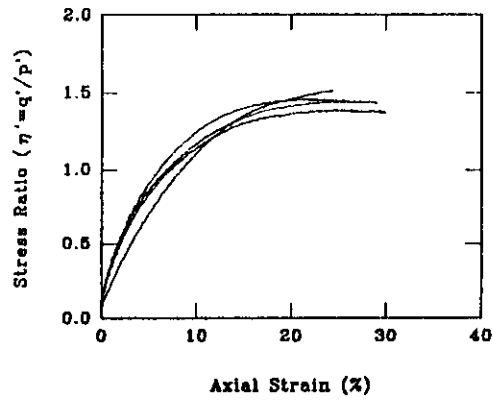
앞에서 검토한 결과에 의하면 한계상태선을 구하면 그림 14와 같다. 그림 14에서 볼 수 있는 바와 같이 한계상태의 응력은 일정한 선 주위에 모이고 있으므로 풍화화강토에도 CSL의 존재를 입증하고 있다. CSL의 기울기( $\lambda$ )와 상관계수는 안동시료는 0.101, 0.964이고 김천은 0.093, 0.946으로 그림 5에서 구한 NCL의 기울기와 거의 동일하다.

#### 4. Cam-Clay Model

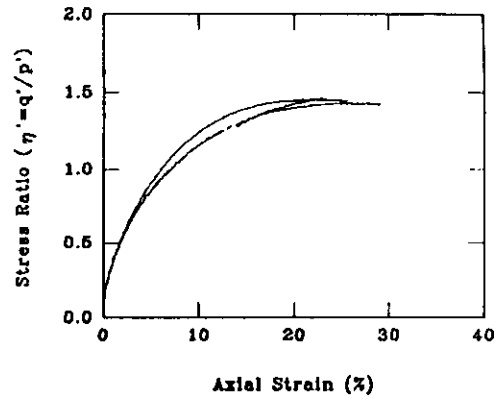
##### 4.1 한계상태와 간극 수압

##### 4.1.1 한계상태

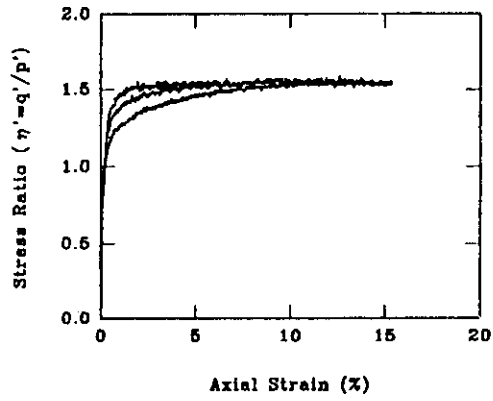
최대유효응력비를 사용하여 응력공간( $q'$ - $p'$  stress space)에서 구한 한계상태선은 그림 15와 같다. 그림과 같이 한계상태마찰상수(critical state friction parameter)를 나타내



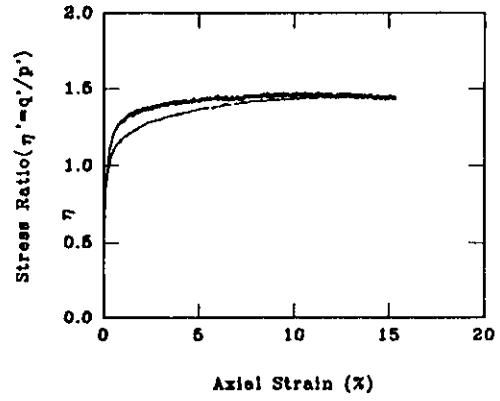
a) Andong(NC)



b) Kimchun(NC)

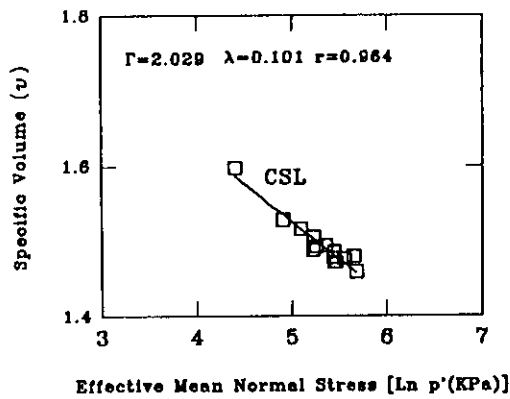


c) Andong(OC)

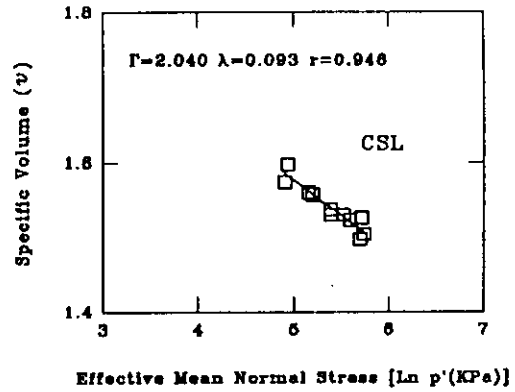


d) Kimchun(OC)

그림 13. 응력비-변형률관계(CID시험)



a) Andong



b) Kimchun

그림 14. Critical State Line의 검토

는 기울기 M값은 그림 8 및 그림 13에서 나타난 최대유효응력비( $\eta_{max}$ )와 거의 같은 값을 나타낸다. M값을 식(1)에 의하여 구한 전단저항각은 표 5와 같으며, 표에서  $FP_{MDS}$ (friction parameter at maximum deviatoric stress)와  $\Phi'_{MDS}$ 는 최대축차응력인 점에서의 기울기와 전단저항각을 나타낸다.

$$M = \frac{6 \sin \Phi'}{3 - \sin \Phi'} \quad (1)$$

풍화토인 경우에 기원, 입도분포와 구성광물에 관계없이 M값이 1.59 정도로 거의 동일한 것<sup>(12)</sup>으로 되어 있으나 본 실험결과는 이보다 다소 작은 값인 안동 1.5, 김천 1.45로 나타났다.

이것은 다른 광물에 비하여 초기에 풍화가 진척되어 타입자 사이에 충전되어 풍화화강토

표 5. Cam-Clay Model Parameter

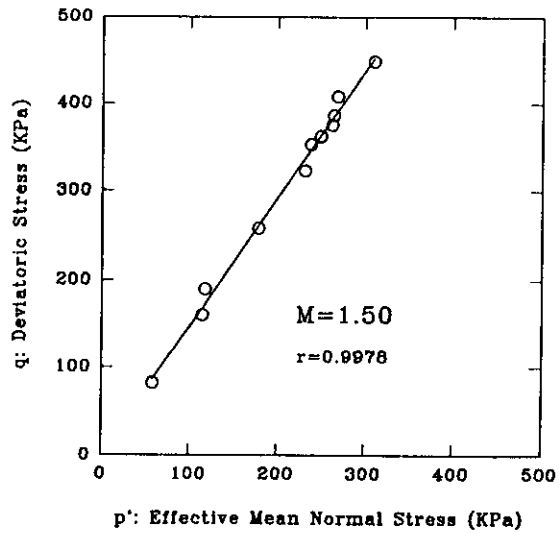
구 분	안 동	김 천
$\lambda$	0.104	0.097
M	1.5	1.45
$\Phi'$	37°	36°
$FP_{MDS}$	1.109	1.204
$\Phi'_{MDS}$	28.0°	30.0°

의 마찰특성을 지배하는 장석분의 구성 비율에 의한 결과이며 또한 조립자의 구성비율에 의한 입자파쇄현상이 서로 다르게 나타나기 때문에 발생한 결과라고 생각된다.

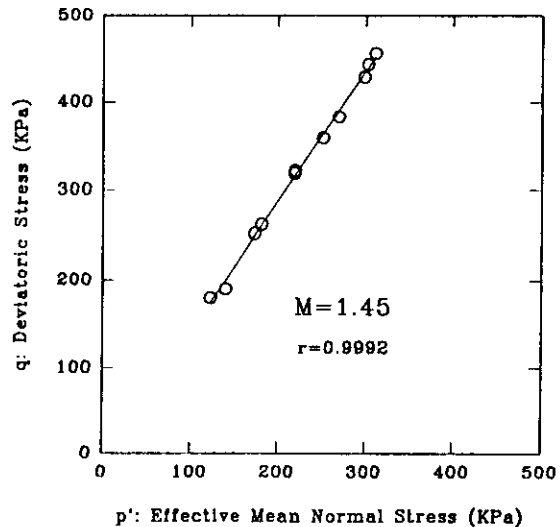
한계상태계수  $\lambda$ 와  $\Gamma$ 는 그림 5에서 나타낸 것과 같으며 한계상태선(CSL)의 기울기는 정규압축곡선(NCL)의 기울기와 거의 동일하다. 그러므로 풍화화강토도 한계상태 구성식의 근본 가정을 만족시키며 적용할 수 있음을 알 수 있으며 비체적 대 응력공간에서 파괴시 모든점이 한계상태선에 접근하는 것은 한계상태가 유일하다는 것을 나타낸다.

#### 4.1.2 간극수압

비배수시험결과를 이용하여 간극수압계수  $A_r$ 를 구하면 표 6과 같다.



a) Andong Sample ( $p'-q$ )



b) Kimchun Sample ( $p'-q$ )

그림 15.  $p'-q$  관계

Wroth<sup>(21)</sup>는 한계상태이론에서 등방정규압밀 및 등방과압밀된 흙에 적용하기 위한 간극수압계수  $A_r$ 의 값을 다음과 같이 제시하였다.

$$A_r = \frac{1}{M} \left( \frac{1}{r} \right)^{-\lambda} + \frac{M}{3} - 1 : \text{정규압밀} \quad (2)$$

$$A_r = \frac{1}{M} \left[ \left( \frac{OCR}{r} \right)^{-\lambda} + \frac{M}{3} - 1 \right] : \text{과압밀} \quad (3)$$

표 6. 파괴시 간극수압계수  $A_r$

안 동				김 천			
구분	$\sigma'_v$ (KPa)	$A_r$	OCR	구분	$\sigma'_v$ (KPa)	$A_r$	OCR
정규압밀 (평균)		1.374		정규압밀 (평균)		1.283	
과압밀	70	-0.042	10	700	0.929	1.14	
	140	0.168	5	80	-0.175	10	
	100	0.043	7	100	-0.082	8	
	350	0.478	2	200	0.113	4	
				400	0.471	2	
				100	-0.034	6	
				200	0.264	3	
				60	-0.174	10	
				150	0.099	4	
				90	-0.029	6.67	
			60	-0.196	10		
			120	0.016	5		
			300	0.523	2		

여기서, OCR : 과압밀비

$r$  : 공간비

Mayne와 Stewart<sup>(14)</sup>는 한계상태이론과 비배수강도비, 과압밀비에 대한  $K_0$ 를 사용하여  $A_r$ 값을 다음과 같이 제시하였다.

$$A_r = \frac{1 - \sin\Phi'}{\sin\Phi'} : \text{정규압밀} \quad (4)$$

$A_r =$

$$\frac{(1 - \sin\Phi')(OCR^{\sin\Phi'} - \frac{2}{3}OCR^{\wedge}) + (\frac{c}{\sigma_{max}})(\frac{OCR}{\sin\Phi'})}{(1 - \sin\Phi') OCR^{\sin\Phi'} + \frac{4}{3}\sin\Phi' OCR^{\wedge} - 1}$$

: 과압밀 (5)

표 6에서의  $A_r$ 값과 식(2)~(5)를 이용하여 구한  $A_r$ 값을 나타내면 그림 16 및 17과 같다.

식 (2)와 식(3)에서 볼 수 있듯이 정규압밀 토인 경우에  $A_r$ 는 구속응력에 관계없이 일정한 것으로 나타나며 그림 16의 실측치와 비교하면 Wroth<sup>(12)</sup>나 Mayne등<sup>(14)</sup>이 제시한 값과 상당한 차이가 난다. 실측치는 구속응력에 관계없이 상당한 분산도를 나타내며 평균치가 1.374와 1.283으로 나타났다. 이것은 매우 예민한 점토의 대표치와 비슷하게 큰 값을 보이고 있다.

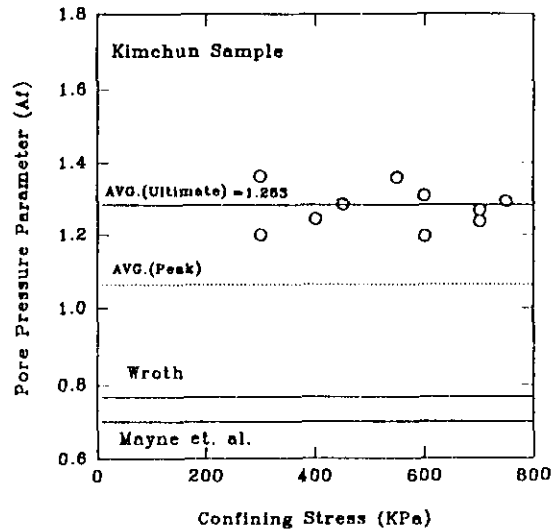
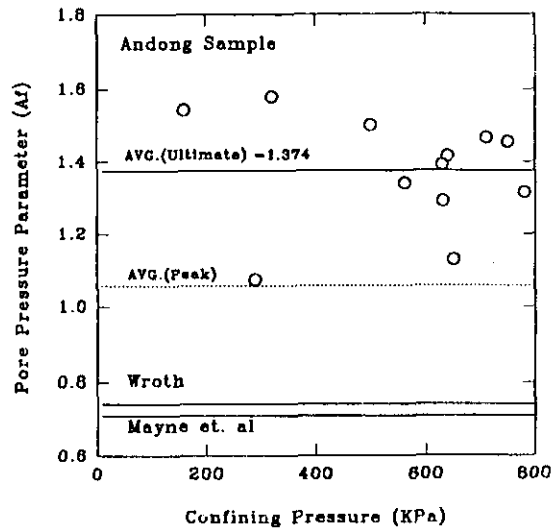
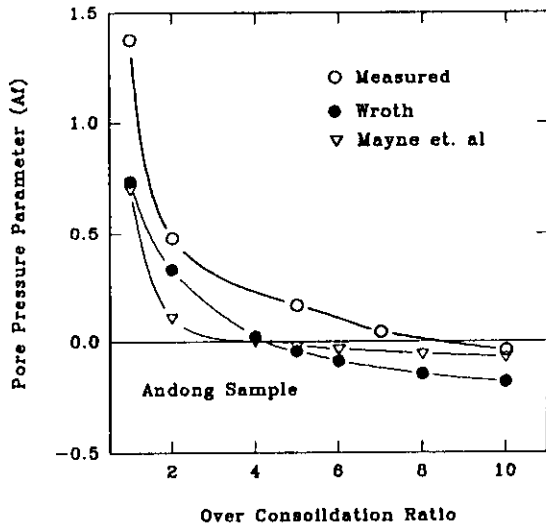
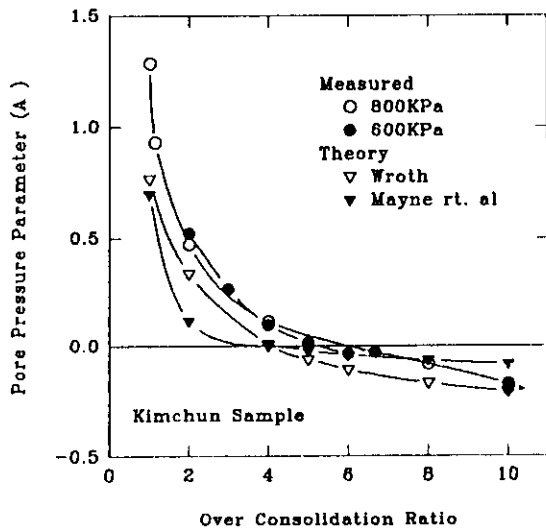


그림 16. 구속응력에 대한  $A_r(NC)$

그림 17은 과압밀토의 과압밀비에 대한  $A_r$ 값을 식 (3) 및 식 (5)에 의한 값과 비교하여 나타내고 있다. 안동시료인 경우 최대구속응력이 700KPa에 대하여 4개의 자료만 있으므로 이들의 연관관계를 검토하기 어렵지만 과압밀비가 8에서 부(-)의 간극수압이 발생하였다. 김천시료는 최대구속응력이 800KPa과 600 KPa에 대하여 동일한 과압밀비를 사용하여 나타낸 것으로 과압밀비가 6이상에서 부의 간극



a) Andong



b) Kimchun

그림 17. OCR-A, 관계

수압이 발생하며, Wroth의 이론 곡선과는 상당히 근접한 결과를 나타내고 있지만 Mayne 등이 제시한 값과 비교하면 큰 차이가 나타난다. 이것은 식 (5)에  $K_0$ 의 영향 즉, Mayne 등이 제시한 이방성압밀에 대한 식(6)과 같은 영향이 포함되어 있으므로 나타나는 결과로 보여진다.

$$K_0 = (1 - \sin\Phi') OCR^{in\phi} \quad (6)$$

이방성압밀과 등방압밀인 경우에는 각각 간극수압 반응형태가 달라 진다는 것을 의미하게 된다. Mayne 등이 제시한 식 (5)의 형태를 살펴보면 과압밀비가 4-5에서 부의 간극수압이 발생하게 되는데 그림 17에서 보는 것과 같이 잘 일치한다.

이상에서 설명한 것과 같이 풍화화강토의 비배수시험시 발생하는 간극수압과 전단특성은 일반적인 이론과는 상당히 차이가 난다. 입상토의 거동에 미치는 영향은 멤브레인관입효과와 입자파쇄현상이 있는데 이들의 영향을 검토하면 다음과 같다.

Lade 등<sup>(11)</sup>의 연구에 의하면 멤브레인관입효과가 전단시 발생하는 간극수압을 감소시키므로 실제의 간극수압은 더욱 증가되어야 하고 유효응력경로는 좌측으로 수정되어야 한다고 한다. 그러므로 풍화화강토에 이특성을 적용하면 간극수압은 더욱 증가하므로 멤브레인관입효과로는 설명할 수가 없다. 입자파쇄현상을 알아보기 위하여 4.1절에서 구한 전단특성을 이용하여 다음과 같은 조건에 대하여 시험을 하여 입도 분포를 비교하였다.

◎  $p' = 400\text{KPa}$ 까지 등방압밀

◎ MDS 일때의 변형률은 2% 내외이므로 400KPa까지 등방압밀 후, MDS 변형률 까지 전단

◎ 400KPa까지 압밀후, 변형률 15%까지 전단.

위의 조건으로 시험한 후의 입도분포곡선은 그림 18과 같다. 그림 18에서 보는 바와 같이 압밀후의 입도분포는 최초의 입도에 비하여 100번 및 200번체 통과량은 약 20% 이상의 차이를 나타내고 있다. 전단때의 입도변화를 살펴보기 위하여 등방압밀시료는 2%까지 전단시켰으며 이때의 변형속도는 "0.2%/분"으로 하였다.

그림 18 a)에서 볼 수 있듯이 압밀중에 발생하는 입도변화는 상당히 크며 MDS까지와 20%까지 변형시킬 때의 입도변화는 같은 입경

에 대하여 약 5% 정도의 차이를 나타내고 있다. CIU시험의 결과를 살펴보면 MDS에 도달할 때까지와 그후의 변형률 15% 이상 즉 극한까지 발생하는 입도의 변화가 큰 것으로 미루어 볼 때, MDS에 도달한 후에도 계속적으로 발생하는 입자 파쇄가 풍화화강토의 간극수압을 크게 발생시키는 주원인임을 추측할 수 있다.

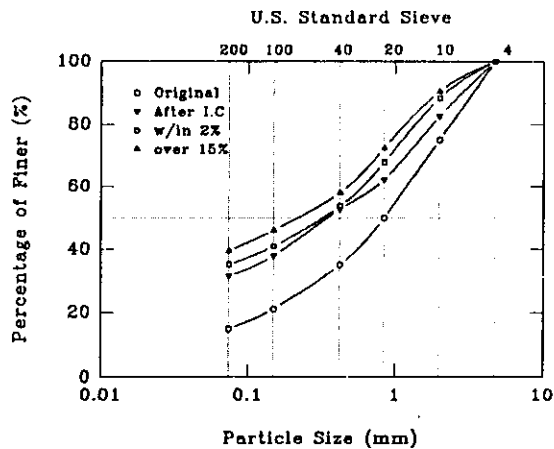


그림 18. 시험후의 입도분포 비교

## 4.2 상태 경계면

### 4.2.1 응력경로

#### 1) 정규압밀흙

정규압밀토의 비배수응력경로는 그림 19와 같다. 그림에서 보는 것과 같이 비배수유효응력경로는 다른 흙의 거동과 같은 형태를 나타내고 있다. 경로의 형태는 변형속도차에 의하여 안동과 김천시료에서 각각 다른 모양을 나타내고 있으나 초기에 MDS를 나타낸 후에 잔류 강도에 도달하는 공통적인 현상을 나타내고 있다.

배수응력경로는 그림 20과 같다. 시험 목적상 극한하중을 25% 이상의 변위가 나타날 때까지의 강도중에서 3.2에서 정의했던 규정이나 25% 이상의 변위때의 강도를 극한강도로 선택하였다. 그림 20에서와 같이 25% 이상의 변위

에서 한계상태선(그림의 실선부분)에 도달하고 있음을 나타내고 있다. 이것으로 미루어 볼 때 풍화화강토인 경우에는 배수상태에서 25% 이상의 변형까지 경화가 발생하며 변형이 허용됨을 알 수 있다.

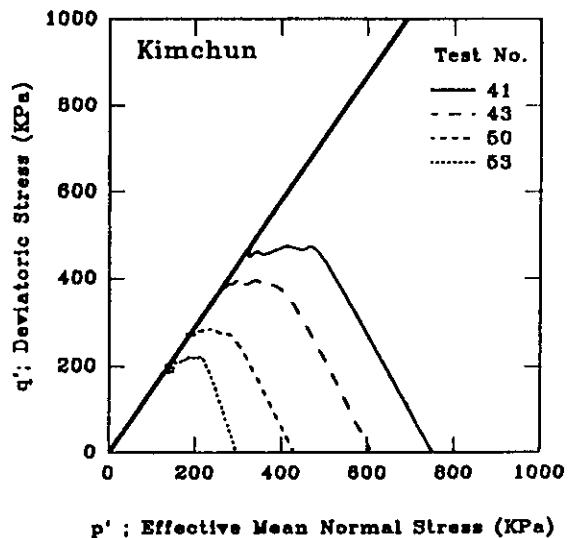
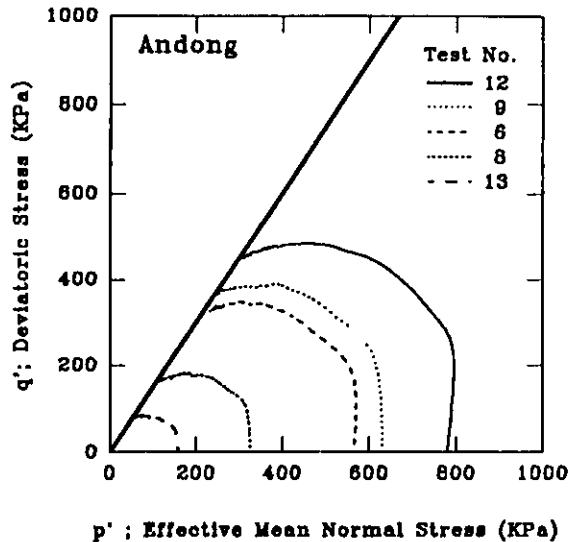
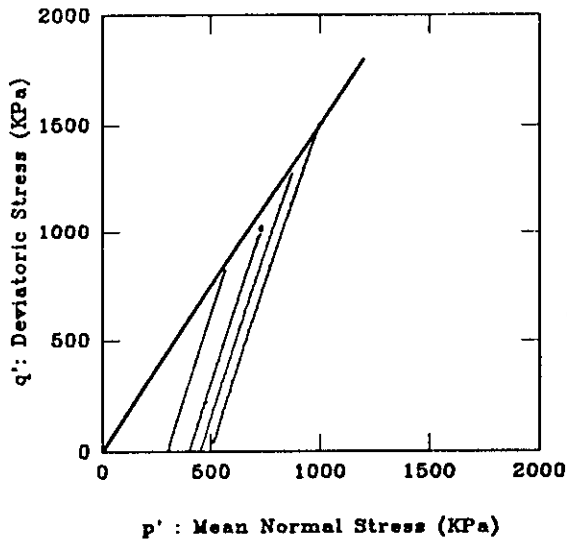
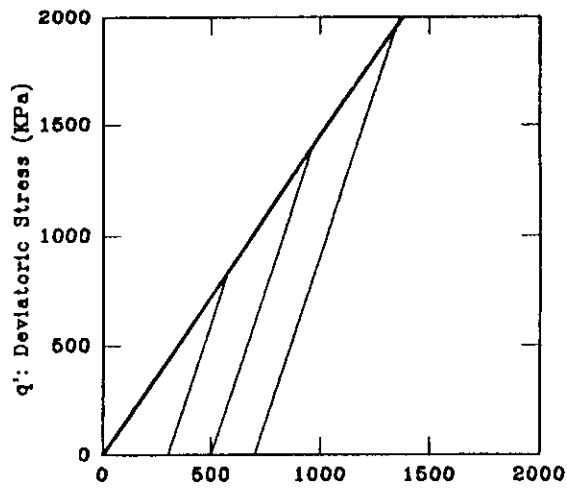


그림 19. 응력경로(NC, CIU시험)





p' : Mean Normal Stress (KPa)  
a) Andong Sample



p' : Mean Normal Stress (KPa)  
b) Kimchun Sample

그림 20. 응력경로(NC, CID시험)

## 2) 과압밀홍

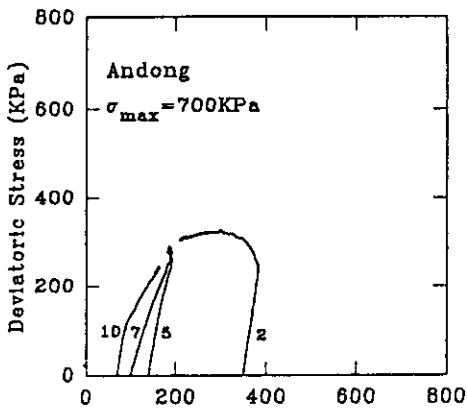
과압밀된 시료의 응력경로는 그림 21과 같다. 3.1.2의 간극수압에서 살펴본 바에 의하면 김천과 안동시료에서 과압밀비가 각각 8과 6에서 부의 간극수압이 발생하는 것으로 나타났으며 그림에서 보는 바와 같이 안동과 김천의

경우 과압밀비 8과 6이 습윤상태(wet-state)와 건조상태(dry-state)의 경계를 이루고 있음을 알 수 있다.  $v \cdot \ln p'$  공간에서 CSL을 중심으로 습윤상태에서는 정(正)의 간극수압이 작용하므로 경로가 우측에서 CSL로 접근하고 건조상태에서는 부(負)의 간극수압에 의하여 CSL 좌측에서 접근하게 된다. 김천시료인 경우에는 그림에서 알 수 있듯이 과압밀비가 4 이하인 경우의 유효응력경로는 좌측에 있으므로 정의 간극수압이 작용하지만 6 이상일 경우에는 전 응력경로의 우측에 있다. 과압밀된 흙에서의 응력경로는  $p'-q'$  평면에서 최대강도로 도달한 후 다시 한계강도로 떨어지면서 접근하는 것이 일반적인 현상이지만 풍화화강토의 경우에는 전술한 바와 같이 과압밀비가 낮은 경우를 제외하고는 최대강도를 나타내지 않고 바로 극한강도 주위에서 응력경로나 유효응력의 변화가 매우 심함을 알 수 있다.

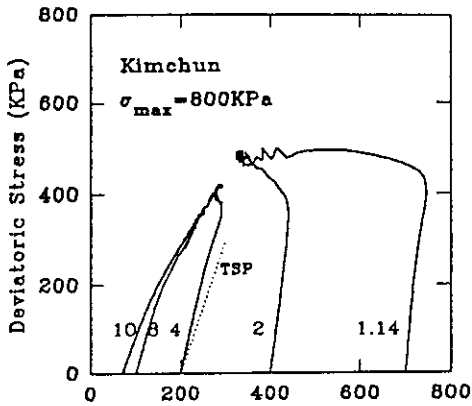
## 4.2.2 상태경계면

### 1) Roscoe면

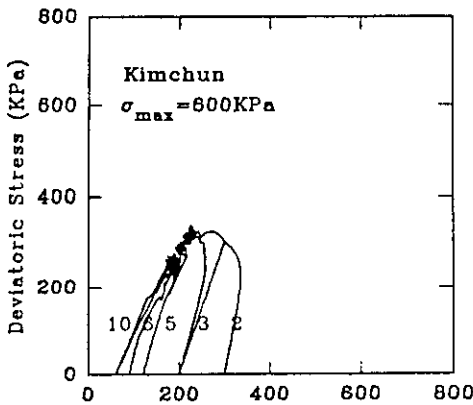
정규화계수(normalizing parameter :  $p_c'$ )를 사용하여 구한 정규압밀홍의 응력경로를 그림 22 및 23과 같이 나타내었다. 그림 22 및 23의 a)는 수정 Cam-Clay 모델의 이론적인 Roscoe면을 한계강도를 사용하여 나타내어 배수 및 비배수경로를 비교하고 있다. 배수 및 비배수경로는 이론곡선보다 아래쪽을 따라 이동하고 있는 현상을 보이고 있다. 그림 22 및 그림 23의 b)는 MDS를 사용한 경우를 나타내고 있다. 이 경우에는 MDS 이론곡선과 실측선이 같은 경로로 이동하고 있음을 나타내고 있다. Lee<sup>(12)</sup>는 Cam-Clay와 수정 Cam-Clay에서의 Roscoe면을 대비시키면서 응력경로를 비교한 결과, 두 면의 중간을 따라서 경로의 이동이 발생하는 특징을 나타내고 있다고 하였다. 본 시험결과와 응력경로형태는 수정 Cam-Clay에서 사용하는 Roscoe면과 일치하지는 않으나 응력



Effective Mean Normal Stress (KPa)



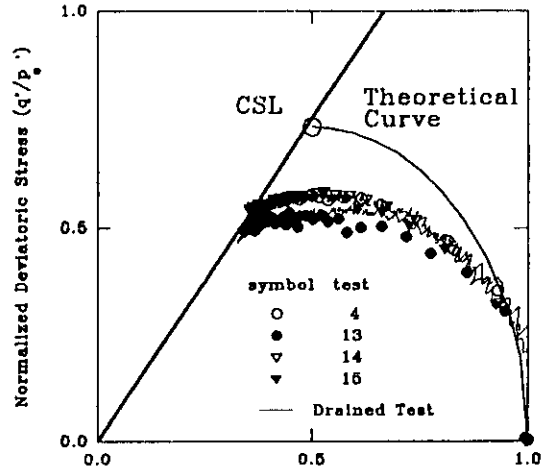
Effective Mean Normal Stress (KPa)



Effective Mean Normal Stress (KPa)

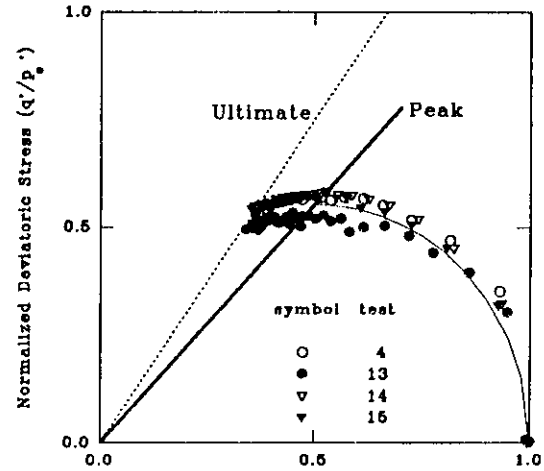
그림 21. 응력경로(OC, CIU시험)

경로의 형태가 유사하고 한점(CSL)에 수렴하는 것으로 보아 Roscoe 평면이 풍화화강토에도 존재하는 것으로 볼 수 있으나 MDS를 채택한 경우의 응력경로가 잘 맞는 것은 설명하기 어려운 현상이다. 그림 8의  $\eta'$ - $\epsilon$  곡선에서



Normalized Mean Stress ( $p'/p'_*$ )

a) Ultimate Case ( $M=1.5$ )



Normalized Mean Stress ( $p'/p'_*$ )

b) MDS Case ( $FP_{MDS}=1.109$ )

그림 22. 정규화된 응력경로(안동시료)

응력비( $\eta$ )가 0.5-0.6인 곳의 변형률은 1-2% 내외임을 알 수 있으며 이것은 3.1.2에서 언급한 바와 같이 간극수압이 축차응력이상 발생하는 변형률이다. 결국 풍화화강토의 경우에서 응력경로가 이론적인 Roscoe면을 따라가지 않는 것은 MDS 즉 최대축차응력 발생 직후 입자파쇄현상에 의하여 순간적으로 발생하는 입자재배열 및 과도한 과잉간극수압에 의한 영향임을 유추할 수 있다.

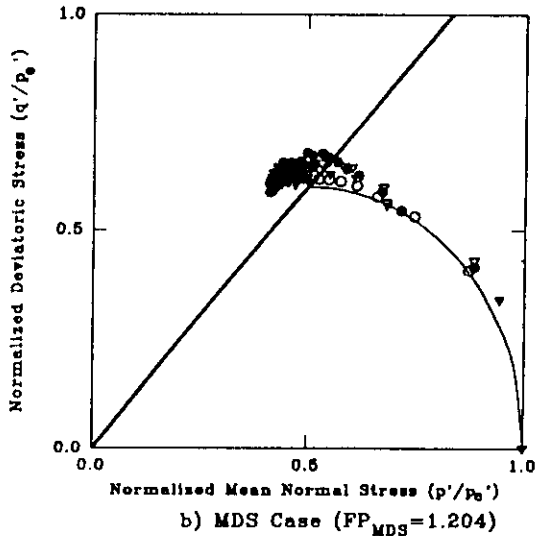
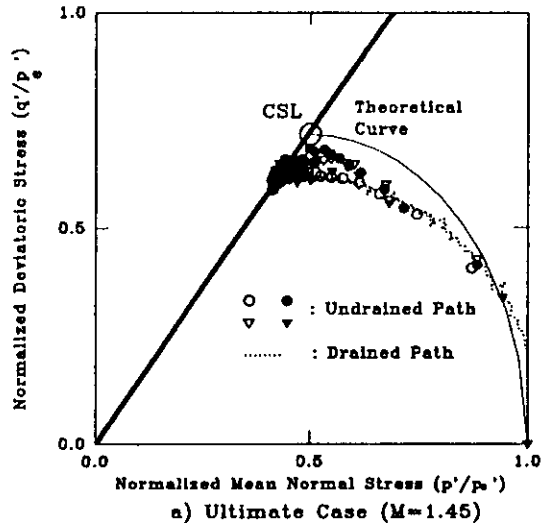


그림 23. 정규화된 응력경로(김천시료)

## 2) Hvorslev 면

과압밀토의 시험결과인 그림 21을 정규화시켜 파괴점을 그리면 그림 24 및 그림 25와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 안동과 김천시료인 경우 Hvorslev면을 규정하는 식 (7)에 필요한 상수  $g$ 와  $h$ 는 표 7과 같이 구할 수 있었다.

$$q' = (M-h) \exp\left(\frac{\Gamma-v}{\lambda}\right) + hp' \quad (7)$$

표 7. 과압밀시료의  $g$ 와  $h$

시료명	$g$	$h$
안 동	0.051	1.274
김 천	0.041	1.310

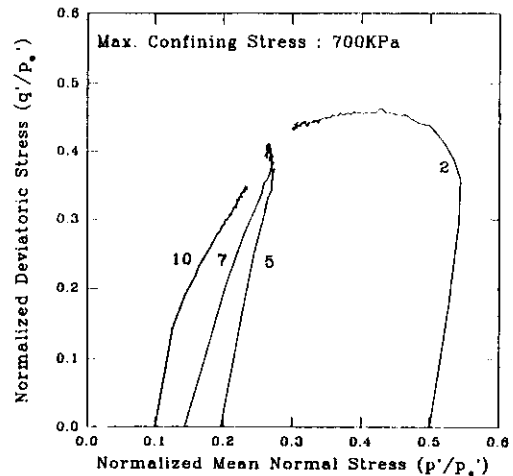


그림 24. 정규화된 응력경로(OC, 안동시료)

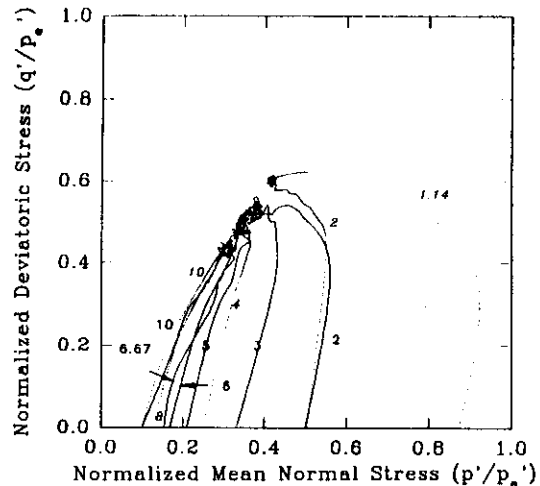


그림 25. 정규화된 응력경로(OC, 김천시료)

그림 25에서 실선과 점선은 최대압밀응력을 각각 600KPa과 800KPa까지 과압밀시킨 것을 나타내는 것이며, 최대압밀응력은 다르지만 정규화시킨 결과 일정한 선주위에서 파괴됨을 알 수 있었으며 이 역시 과압밀시료인 경우에도 Hvorslev의 파괴 기준 즉 Hvorslev면을 적용할 수 있음을 나타낸다.

이상의 1)과 2)에서 규정한 Roscoe와 Hvorslev면을 조합하여 그림 26과 같은 상태 경계면을 구할 수 있었다.

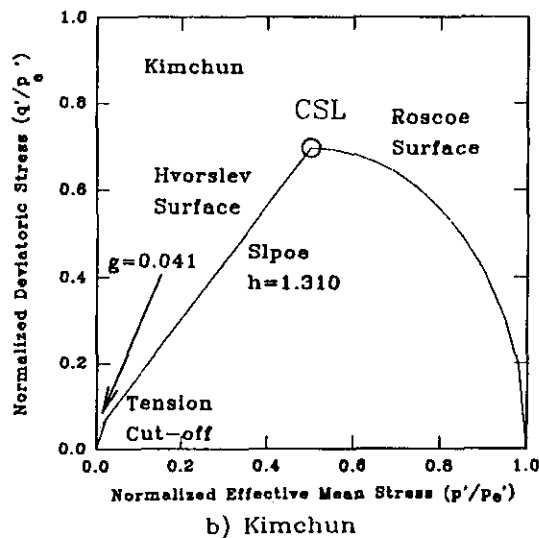
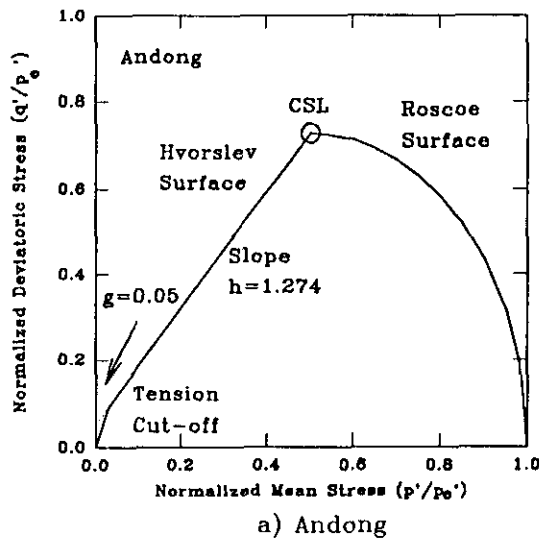


그림 26. 상태경계면

### 4.3 응력 대 변형률관계

#### 4.3.1 응력 대 변형률

3.1 및 3.2절에서 구한 풍화화강토의 역학적 특성을 이용하여 Cam-Clay모델에 적용할 수 있는가를 최종적으로 점검하기 위하여 배수 및 비배수시험의 응력-변형률 관계를 시험치 및 이론치로 비교하고자 한다.

Cam-Clay모델 상수를 이용하여 비배수시험의 응력-변형률 관계를 나타내면 그림 27과 같다. 그림 27에서 보는 것과 같이 축차응력은 극한강도정수를 사용하면 상당한 차이를 나타내며, MDS정수를 사용하면 변형률 차이는 있지만 축차응력은 거의 일치하고 있다. 간극수

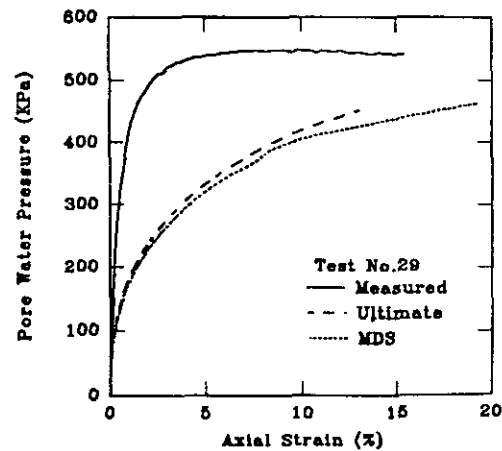
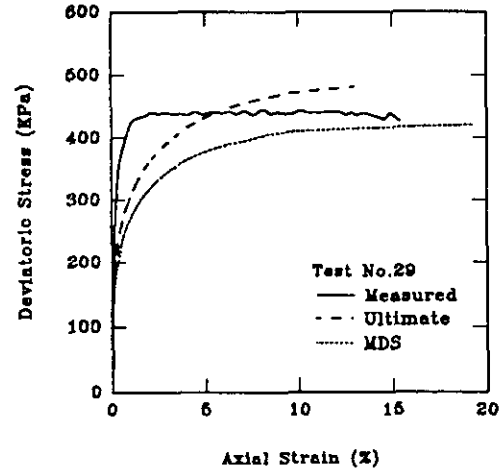


그림 27. 비배수시험의 실측치와 예측치의 비교 (Cam-Clay)

압의 거동형태는 어떤 강도를 사용하든지 실측치에 비해 매우 큰 차이를 나타내고 있는데 이것은 앞에서 설명한 입자파쇄현상 때문인 것으로 생각된다. 배수시험인 경우에는 그림 28에서와 같이 MDS정수를 사용하면 실측치와 아주 큰 편차가 발생하며, 극한강도정수를 사용하면 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 변형률 증가에 대한 체적 변형률은 초기인 5% 내에서는 유사한 결과를 나타내지만 10% 이상의 변형률에서는 편차가 크게 나타난다.

그림 28 a)와 b)의 예측곡선형태를 비교하면, 변형률에 대한 축차응력과 비체적의 변화

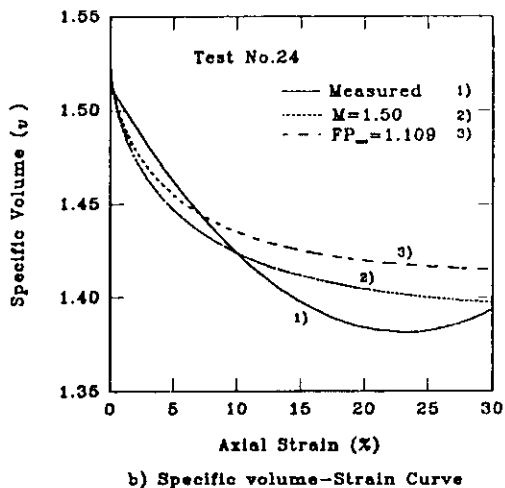
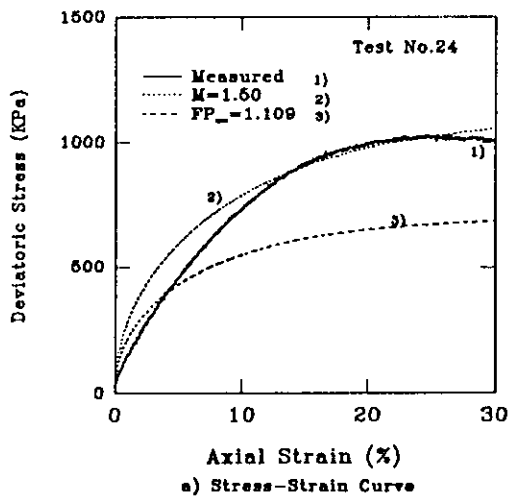


그림 28. 배수시험의 실측치와 예측치의 비교 (Cam-Clay)

율이 거의 비슷하다. 그러나 실측치를 분석하면 축차응력은 10% 내외에서 곡선의 변화율이 저감하지만 비체적의 변화형태는 비교적 경사가 급하다. 이것은 주로 멤브레인관입효과와 입자파쇄현상이 배수시험에 영향을 미치는 것으로 유추된다.

#### 4.3.2 Parameter 분석

앞에서 응력-변형률 관계를 검토한 결과에 의하면 실측곡선과 예측곡선이 경우에 따라 상당한 차이를 나타내었다. 이것은 자기 모델이 가지고 있는 이론적 한계성과 변수선정의 오차에 의한 것으로 추정할 수 있다. 비배수구성식

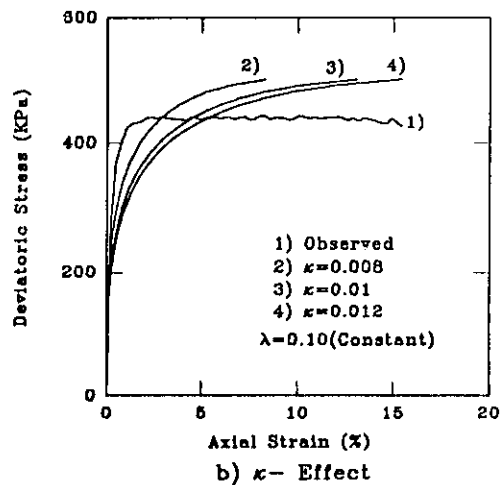
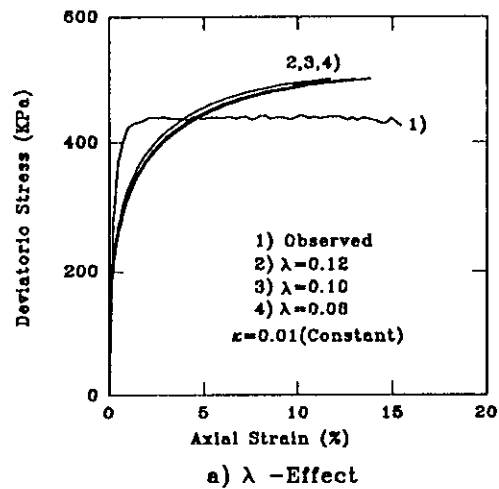


그림 29. 비배수거동에 대한 매개변수분석

인 경우 Cam-Clay모델은 전단에 의하여 발생하는 체적변형률에 의한 경화가 고려되어 있지 않기 때문에 초기변형률과 축차응력의 오차가 크게 발생하는 것으로 생각된다. 그 반면에 배수구성식인 경우에는 반대의 현상이 발생하고 있다.

구성식의 한계에 의한 오차외에 변수선정에 의하여 발생하는 오차의 범위를 추정하기 위하여 변형에 가장 큰 영향을 미치는 변수인  $\lambda$ ,  $\kappa$ 에 대하여 분석하였다.  $\lambda$ 와  $\kappa$ 는 각각 전체변형량 및 탄성변형량과 직접적인 관계가 있으므로 시험에서 구한 값이  $\pm 20\%$ 의 범위에 대하여 구한 응력-변형률 관계는 그림 29 및 30과 같다.

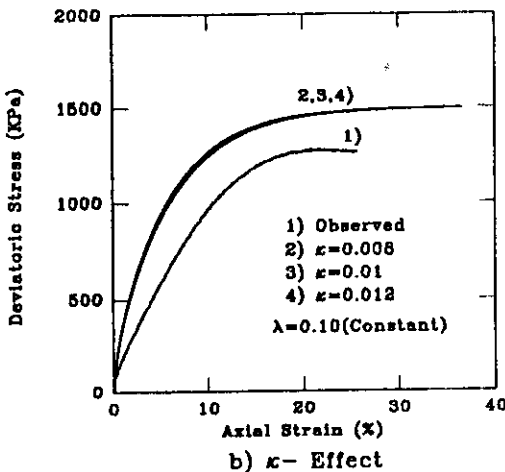
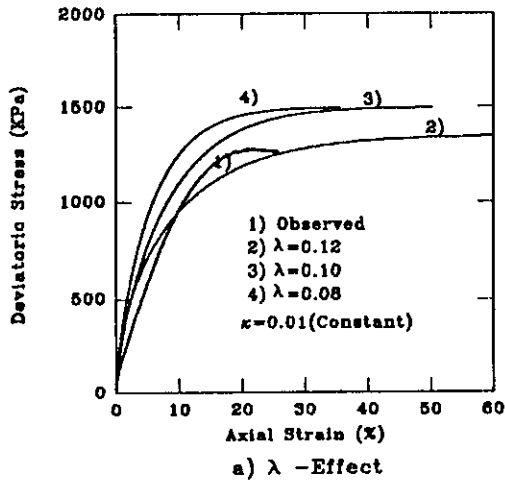


그림 30. 배수거동에 대한 매개변수분석

그림 29는 비배수거동에 대한 것으로 a)에서  $\lambda$ 를 변화시킨 결과는 실측치와 오차가 있으나  $\lambda$ 가 감소할 수록 초기기울기가 증가하지만 예측치의 변동폭은 거의 없는 것으로 나타났다. 그림 29 b)는  $\kappa$ 의 변화에 대한 것으로  $\kappa$ 가 감소할 수록 기울기가 증가하며  $\lambda$ 에 비하여 변동폭이 크다. 그러나 그림 30에서 볼 수 있는 것처럼 배수거동에서는  $\kappa$ 보다도  $\lambda$ 의 영향이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 즉  $\lambda$ 가 감소할 수록 곡선의 기울기가 매우 급하여 지지만  $\kappa$ 의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이상의 사실로 미루어볼 때  $\lambda$ 는 압밀과 동일하게 전체변형량과 관계가 되고 소성변형량과 밀접한 관계가 있으므로 배수거동에서는 전단도중에도 소성변형 즉 경화현상이 발생하는 것으로 유추할 수 있으며 예측치와 거의 일치하는 경향을 보인다. 그러나 비배수거동에서는 예측치보다도 작은 축차응력을 나타내는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 입자파쇄현상에 의하여 추가적으로 발생하는 간극수압의 영향이  $\lambda$  및  $\kappa$ 의 변화에 의한 영향보다 큰 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 우리나라 전역에 산재하고 있는 풍화화강토의 공학적특성연구를 위하여 모암의 생성기원 및 조직이 다른 안동과 김천에서 채취한 시료를 다짐에너지에 의하여 의사와 압밀효과가 나지 않도록 다진후 삼축시험을 실시하여 압밀 및 강도특성을 규명하였다. 압밀 및 전단시험에서 구한 자료를 이용하여 Cam-Clay모델에 적용하여 예측치와 실측치를 비교하였다.

### 5.1 강도 및 거동특성

1) 안동과 김천시료는 각 화강암질 풍화토 및 편마암질 풍화토로서 생성기원의 차이가 있으나 강도정수가 전단저항각은  $1^\circ$ , 압밀특성은  $\lambda$ 가 0.007 정도의 차이만 보여 공학적으로 거의 같은 특성을 나타내었다.

2) 풍화화강토를 포화시켜 실내시험을 한 결과 기존의 모래 혹은 점토와는 거동특성이 다르게 나타났다. 비배수시험에 의하면 과압밀비가 2보다 작을 경우에는 최대축차응력(MDS)을 나타내지만 과압밀비가 큰 경우에는 MDS가 나타나지 않고 극한강도만 나타났다. 과압밀비가 큰 경우의 비배수시험에서는 최대유효응력비가 나타나는 것이 일반적인 현상이지만 부(-)의 간극수압은 발생하였으나 풍화화강토의 경우에 최대유효응력비가 발생하지 않는 현상이 발생하였다.

3) 정규압밀된 흙의 비배수시험결과에 의하면 간극수압계수가 1.3 이상으로 나타났다. 이 현상을 규명하기 위하여 등방압밀후와 변형을 달리하여 입도분포를 분석한 결과, 변형의 증가에 따라 파쇄정도가 심하게 나타났으므로 입자파쇄가 간극수압량에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 유추된다.

4) 전단시험에서 구한 한계상태의 전단저항각은 풍화화강토에 대한 연구들과 비교하면 6° 정도가 낮은 36° 이었다.

5) 삼축압축시험결과  $\ln p' - v$  공간에서 한계상태선이 형성되고 응력경로가 일정한 상태에 접근하므로 수정 Cam-Clay 이론의 적용이 가능한 것으로 판단되지만, 정규압밀응력경로는 Roscoe면 아래쪽에서 한계상태에 접근하는 것으로 나타났다. 그러나, MDS시의 정수를 사용하였을 때에 예측한 이론곡선과는 일치하는 경로를 나타내고 있으며, 이는 MDS를 전후하여 입자파쇄가 심하기 때문에 파쇄후의 강도정수보다 MDS시의 강도정수를 사용하는 것이 시료의 거동요건에 맞다고 생각된다. 안동, 김천 시료 모두 Normalized Mean Normal Stress가 0.5 부근에서 MDS가 일어남을 알 수 있었다. 습윤상태와 건조상태의 한계는 안동인 경우에 과압밀비 8, 김천은 6을 기준으로 부의 간극수압이 발생하였다.

## 5.2 구성식의 적용

1) 비배수거동은 실측치와 예측치가 상당한

차이를 나타내었는데, 이는 최대축차응력은 극한강도를 사용할 경우 실측치 이상을 나타내며 응력-변형률곡선의 기울기는 실측치보다 다소 완만한 형태를 나타내었다. Cam-Clay 모델에서 축차응력의 차이가 발생하는 것은 입자파쇄에 의하여 응력경로가 최대점에서 약간 아래로 접근하기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

2) 배수거동에서는 실측치와 예측치가 상당히 근접하는 결과를 나타내고 있다. 그러나, 체적변형은 실측치가 예측치보다 큰 양이 발생하고 있는 데 이것은 모델오차 외에 멤브레인 관입효과에 의한 것으로 판단된다.

3) Cam-Clay 모델의 거동에 미치는  $\lambda$  및  $\kappa$ 의 영향을 분석하여 본 결과, 배수거동에서는  $\lambda$ 의 영향이 크고 비배수거동에서는  $\kappa$ 의 영향이 지배적인 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 '박사학위 논문지원프로그램(89)'에 의하여 이루어진 것으로 귀재단에 감사를 드리며, 기계를 사용하도록 해주신 육군사관학교와 김운영 교수님께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. ASTM(1970), "Standard Test Method for Unconsolidated Undrained Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression", ASTM D 2850-70
2. Atkinson, J. H.(1992), "An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations", McGraw-Hill Book Co.,
3. Black, D. K., and Lee, K. L.(1973), "Saturating Laboratory Samples by Back Pressure", J. SMFE. Div., ASCE, Vol. 99, pp. 75-93.
4. BS 1377 ; part 1, Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes, Part 1, General Requirements and Sample Preparation, British Standards Institution.
5. Chan, C. K.,(1981), "An Electropneumatic

- Cyclic Loading System", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 4, No. 4, Dec. 1981, pp. 183-187.
6. Chan, C.K.,(1990), "Automated Triaxial Testing Manual",
  7. Holtz, R. D., and Kovacs, W. D.,(1981), "An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall"
  8. JSSMFE(1982), "Soil Testing Method", Japan Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering
  9. Lade, P. V.(1977), "Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surface", *Int'l J. Solids and Structure*, Vol. 13, pp. 1014-1035.
  10. Lade, P. V., and Duncan, J. M.,(1977), "Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soils", *J. SMFE Div., ASCE*, Vol. 99, No.SM10, pp. 755-812.
  11. Lade, P. V., and Hernandez, S. B.,(1977), "Membrane Penetration Effects in Undrained Tests", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 103, No.GT2, pp. 109-125
  12. Lee I.-K.,(1991), "Mechanical Behavior of Compacted Decomposed Granite Soil", A Thesis submitted for the degree of Ph. D, City Univerdity, London.
  13. Lowe, J., and Johnson, T. C.,(1960), "Use of Back Pressure to Increase Degree of Saturation of Triaxial Test Specimen", *Proc. of the ASCE Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, pp. 819-836.
  14. Mayne, P. W., and Stewart, H. E.,(1988), "Pore Pressure Behavior of  $K_0$ -consolidated Clays", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 114, No.GT11, pp. 1349-1346.
  15. Miura, N., and O-hara, S.,(1979), "Particle-Crushing of a Decomposed Granite Soil under Shear Stresses", *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 3, pp. 1-14.
  16. Murata, H. and Yasufuku, N.,(1987), "Mechanical Properties of Undisturbed Decomposed Granite Soils", *Proc. of the 8th Asian Regional Conference on SMFE*, Vol. 1, pp. 193-196.
  17. Rad, N. S., and Clough, G. W.,(1984), "New Procedure for Saturating Sand Specimens", *J. Geotech. Engrg. ASCE*, Vol. 110, No.GT 9, pp. 1205-1218.
  18. Rowe, P. W., and Barden, L.,(1969), "Importance of Free Ends in Triaxial Testing", *J. SMFE Div., ASCE*, Vol. 90, No.SM 1, pp. 1-27.
  19. Sarby, R. W., Kalteziotis, N., and Haddad, E. H.,(1982), "Compression of 'Free-ends' Deriving Triaxial Testing", *J. of Geotech. Engrg. ASCE*, Vol, 108, No.GT 1, pp. 83-107.
  20. Skempton, A. W.(1954), "The Pore Pressure Coefficients A and B", *Geotechnique*, Vol. 4, pp. 143-147.
  21. Wroth, C. P.,(1984), "The Interpretation of In-situ Soil Test", *Geotechnique*, Vol. 34, No. 4, pp. 449-489.

(접수일자 1994. 5. 4)