

전단속도와 소성지수를 달리한 재생성 점성토의 응력-변형을 거동

Stress-strain Behavior of Remolded Clay Using Different Shear Rate and Plastic Indices

이 용 희¹⁾ · 강 권 수²⁾ · 정 상 국³⁾ · 강 진 태⁴⁾ · 김 대 현[†]

Lee, Yonghee · Kang, Kwon-Soo · Jung, Sang-Guk · Kang, Jintae · Kim, Daehyeon

ABSTRACT : In general, the shear strength of a clay specimen under the direct shear test and the triaxial compression test increases with an increase in the shear rate. This study investigates the effects of shear rate and silt content on the stress-strain behavior of remolded Gwangyang clay, by changing the shear rate and the silt content. Based on the results of the triaxial compression tests, the equi-strain line of remolded Gwangyang clay shows initially positive slope and then becomes flat at certain strain level. As the strain level where the equi-strain becomes flat is different depending on the soil with different silt contents, this can be considered as the inherent property of soil.

Keywords : Remolded clay, Silt content, Equi-strain line, Shear rate

요 지 : 직접전단시험이나 삼축압축시험 시 하중재하속도가 증가할수록 시료의 전단강도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 점성토 지반의 거동특성에 영향을 미치는 중요한 두 가지 요인, 즉 전단속도와 실트함유량에 따른 점성토의 응력-변형률 거동특성을 규명하기 위하여 광양지역의 재생성 점성토를 대상으로 완속재하 상태에서부터 급속재하 상태까지 재현함과 동시에 실트 함유량 변화 시 그 거동 특성이 어떻게 변화되는지에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 동일변형률에서의 전단속도 증가에 따른 축차응력의 변화, 즉 등변형률선의 기울기는 양의 기울기를 가지며 일정변형률 이상에서는 기울기의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 그리고 기울기 변화가 없는 지점의 값은 흙의 종류에 따라 달라지므로 그 흙이 가지는 고유 특성인 것으로 판단된다.

주요어 : 재생성 점토, 실트 함유율, 등변형률선, 전단속도

1. 서 론

일반적으로 연약지반에 성토 시 지반의 안정성에 영향을 미치지 않는 범위내의 최대 하중재하속도로 재하하는 것이 일반적이며, 이러한 일련의 시공과정을 시뮬레이션하기 위하여 지반의 응력-변형 관계가 전 시공과정을 통해 명확하게 수치해석이 수행되어야 한다. 이러한 수치해석이 이루어지기 위해서는 수학적인 정형식, 즉 구성식이 필요하며, 이러한 구성식의 연구는 첫째, 사건과는 무관한 평형상태에서의 재하에 의한 응력-변형률관계를 설명하려는 연구와 둘째, 변형이 시간에 의존한다는 관점에서 전단변형속도, 응력완화, Creep 시험을 통한 점토의 거동을 표현하려는 연구로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 후자의 시간효과를 고려한 점성토의 구성방정식을 만들기 위한 시간효과에 대한 응력-변형률 거동특성에 대한 기초적인 연구이다.

본 연구에서는 시간효과 중 전단속도에 따른 점성토의 응력-변형률 거동특성을 파악하기 위하여 4종류의 완전 포화된 정규압밀점토에 대하여 일정변형률 전단시험을 실시하여, Young 등(1969) 및 Murayama 등(1974)의 시험결과와 타당성을 평가하고 시간효과에 따른 응력-변형률 시간의 유일한 관계의 존재를 규명하고자 한다.

2. 시험 방법

2.1 시료의 준비 및 제조

2.1.1 시료 준비

본 연구에서는 전남 광양의 해성점토(CH)를 채취하여 균질하고 일반적인 점토시료를 재현하기 위하여 이물질을 제거한 후, 일정량의 첨가제(Bentonite 분말, Silica 분말)를 넣어

1) 정희원, 한전 전력연구원 원자력발전연구소 연구원

2) 정희원, 서남대학교 토목공학과 조교수

3) 비희원, 송원대학 U-건설토목과 교수

4) 비희원, 전남대학교 공업기술연구소 연구원

† 비희원, 조선대학교 토목공학과 조교수(E-mail : dkimgeo@chosun.ac.kr)

표 1. 시료의 물리적 특성

Sample	비중	액성한계 (%)	소성지수 (%)	#200체 통과율 (%)	실트함유율 (%)	첨가제 중량비 (%)	USCS
MG1	2.738	78.20	54.57	99.59	65.82	Bentonite 30%	CH
MG2	2.719	51.58	24.81	98.12	71.75	원지반	CH
MG3	2.651	39.47	14.47	98.85	73.72	Silica 20%	CL
MG4	2.641	34.19	9.60	99.38	75.49	Silica 40%	ML

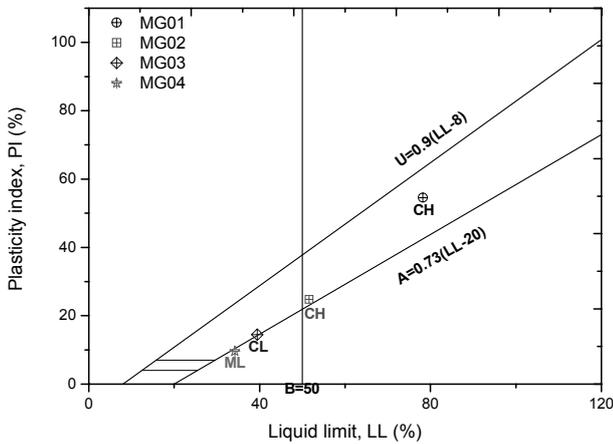


그림 1. 시료의 Plasticity Chart

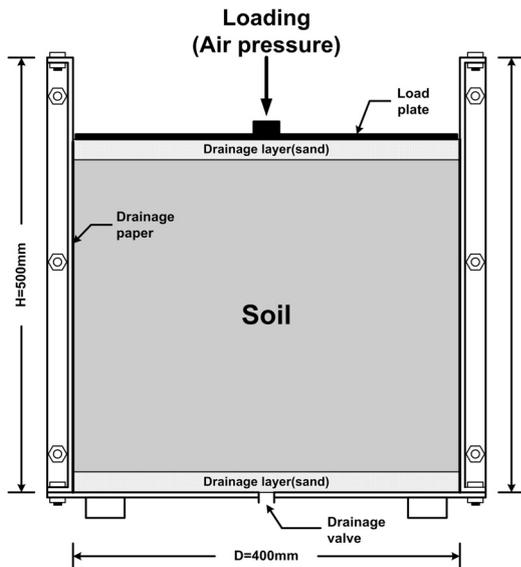


그림 2. 모형토조 개략도

4종류의 슬러리(slurry) 상태의 시료를 제작하였다. 이는 기존 60여 개소의 광양점토 입도분석 결과 실트(0.074~0.002mm) 함유율이 평균 63%, 최대 약 78% 정도의 범위로 분포하는 것으로 나타났으며, 통일분류법상의 구분기호도 ML, CL, CH로 분류됨에 따라 이를 고려하여, 본 연구에서도 이와 유사한 범위를 재현하기 위하여 실트 함유율 약 65~75% 사이의 시료를 제작하였다. 이때의 함수비는 액성한계의 약 3배인 150%로 일정하게 유지하였다. 표 1은 4종류 시료의 물리적 특성을 나타낸 표이며, 그림 1은 시료의 소성도표를

나타낸 그림이다.

시험에 필요한 시료를 제작하기 위하여 모형토조를 이용하였으며, 그림 2는 본 연구에 사용된 모형토조의 개략도를 보인 것으로 직경(D) 400mm, 높이(H) 500mm의 원통형이며, 상부와 하부에서 원활한 배수가 이루어질 수 있도록 하였다.

2.1.2 시료의 제조

시료의 조성은 그림 2에 나타낸 바와 같이 모형토조를 사용하여 슬러리 상태의 시료를 투입한 후 일정한 압밀압력을 재하였다.

압밀압력의 재하는 공기압 실린더를 사용하여 최초 5kPa을 작용시킨 후, 최종 압밀압력인 50kPa까지 단계별로 5kPa씩 증가시켰다. 매 단계 압력의 증가는 전 단계 압력에 의한 침하가 더 이상 발생하지 않음을 확인한 후 다음 단계의 압밀압력을 가하였다. 그리고 최종단계의 압력(50kPa)을 재하 후 30일간 압밀압력을 그대로 유지한 다음 불교란 시료를 채취하였다.

2.2 시료의 채취

압밀이 완료된 시료는 thin wall tube를 사용하여 채취하였다. 시료 채취 시 샘플러의 관입 등으로 인한 주변 시료의 교란영향을 최소화하기 위하여 이웃하는 위치 간에 최소 0.5d (여기서, d는 샘플러의 직경, d=76mm) 이상 이격하여 채취하였으며, 벽면으로부터는 50mm 이상 이격하여 측면배수로 인한 다른 위치와의 함수비 차를 최소화하였다.

샘플러의 관입은 유압피스톤을 이용하였으며, 관입속도는 30mm/sec를 유지하였다. 샘플러의 관입이 완료되면 샘플러의 인발로 인한 시료의 팽창이나 균열 등을 방지하기 위하여 샘플러가 관입된 상태에서 모형토조를 조심스레 해체하였다. 채취가 완료되면 시료의 상·하부를 파라핀을 사용하여 밀봉한 후 함수비의 변화를 억제하고 외부 온도 변화에 대해 최대한 일정한 상태를 유지하기 위하여 채취 후 곧바로 습윤상자에 보관하여 사용하였다.

2.3 일정변형을 비배수 삼축압축시험

시료에 작용하는 전단속도의 크기에 따라 전단강도가 다르게 발현되므로, 본 연구에서는 전단속도를 다양하게 변화

표 2. 시험 전단속도

Sample	전단속도(%/min)
MG1, MG2, MG3, MG4	0.1, 0.5, 2.0, 5.0

시커 각각의 전단속도의 변화가 전단거동, 즉 축차응력과 간극수압의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위하여 일정변형률 전단시험을 실시하였다.

시험에 적용된 변형률 속도는 공시체의 높이에 대해 0.1~5.0%/min까지 실시하여 완속재하 상태에서부터 급속재하 상태까지를 재현하였으며, 표 2는 일정변형률 전단시험에 적용된 전단속도를 나타낸 것이다.

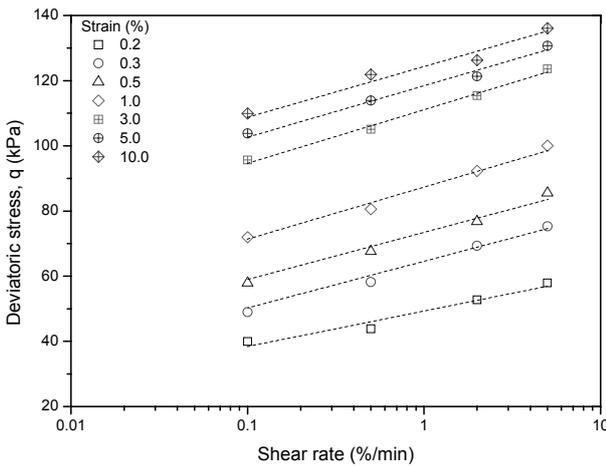
3. 전단속도에 따른 응력-변형률 거동

3.1 축차응력 거동

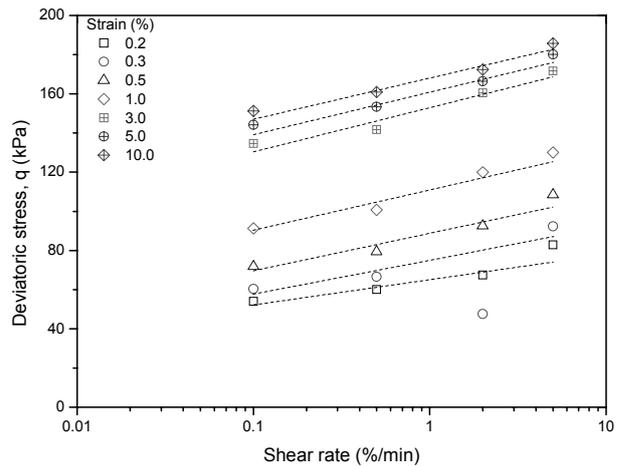
실트함유량이 서로 다른 4가지 종류의 재생성 점성토를

최종 200kPa의 압밀압력으로 등방압밀 시킨 후 0.1, 0.5, 2.0, 5.0%/min의 전단속도로 비배수 시험을 실시하였다. 그림 3에 나타난 바와 같이 모든 시료에서 전단속도가 빨라질수록 축차응력의 크기는 커지지만, 과잉간극수압은 전단속도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

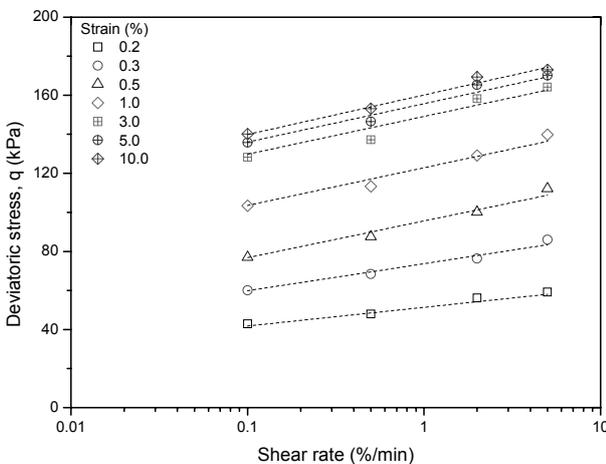
특히 전단속도와 축차응력의 관계는 그림 3에 나타난 바와 같이 전단속도가 증가할수록 축차응력이 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 널리 알려진 바와 같이 빠른 전단속도로 시험 시 지반정수가 과대평가될 수 있음을 의미하며, 화강토에 대한 전단속도의 영향을 분석한 문경록(1999)의 연구결과와도 동일한 결과이다. 또한 동일 변형률에서의 전단속도의 증가에 따른 축차응력의 변화 즉, 등변형률선의 기울기는 양의 기울기를 가지며, 변형률 0.9~1.1% 이상의 변형률에서는 기울기의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 거동은 Young 등(1969)이 점토의 거동에 대하여 시간효과를 결합하기 위해 실시한 일정변형률 충격재하시험의 결과와 유사한 결과이며, 등변형률선의 기울기는 1% 내



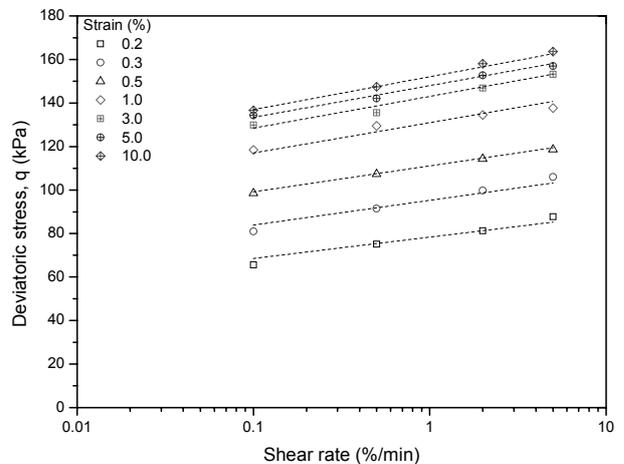
(a) MG1



(b) MG2



(c) MG3



(d) MG4

그림 3. 전단속도와 축차응력의 관계

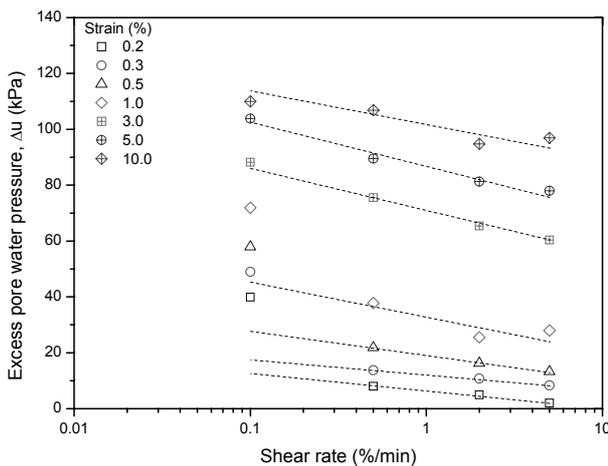
외의 축변형률에 도달할 때까지는 증가하지만 그 이상의 축 변형률에서는 축변형률이 증가하더라도 기울기의 증가는 없는 것으로 나타났다.

3.2 간극수압 거동

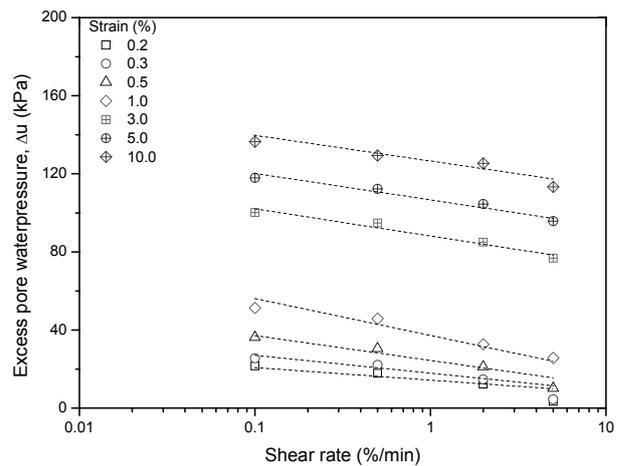
전단속도와 과잉간극수압의 관계는 그림 4에 나타난 바와 같이 동일한 축변형률에서 전단속도가 증가함에 따라 과잉간극수압은 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 그 기울기는 음의 상관관계를 보이고 있다. 그러나 Akai 등(1974, 1975) 및 이진수(1983)의 연구결과와 마찬가지로 과잉간극수압과 축변형률의 상관관계는 분명하지 않으며, 이는 동일 변형률에서 전단속도의 증가에 따른 과잉간극수압의 감소가 흙의 본질적인 특성이 아닌 일종의 타임래그(time lag)현상, 즉 빠른 속도로 하중 재하 시 간극수압의 실제 발현과 측정사이의 지연현상에 의한 결과인 것으로 추정된다.

압밀비배수전단삼축시험은 흙의 압밀이 발생된 후 하중의 재하로 인해 비배수 조건에서 흙의 전단거동을 파악하기

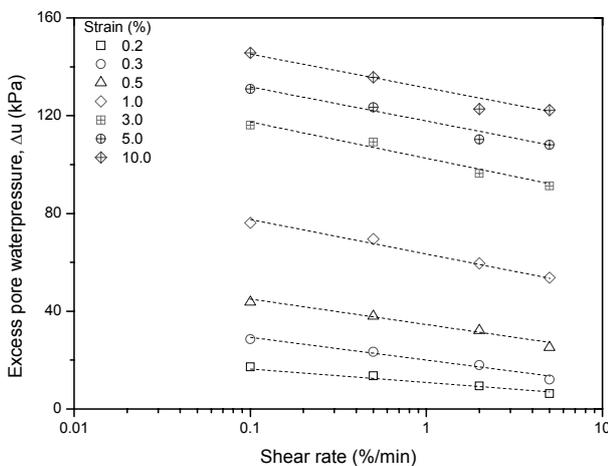
위한 실험이다. 전단 시 축하중이 증가하면 평균전응력이 증가하며, 비배수전단시험에서는 흙의 체적변화가 발생하지 않으므로 평균유효응력에는 변화가 없다. 이러한 조건이 발생하기 위해서는 평균전응력이 증가하는 동일한 양만큼 과잉간극수압이 발생하여야 할 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 그림 3(a)로부터 전단속도 0.1(%/min)에서의 10% 변형률의 축차응력은 약 110kPa 이며 그림 4(a)로부터 0.1(%/min)에서의 10% 변형률의 과잉간극수압은 110kPa로 이론적인 비배수거동과 일치한다. 그러나 전단속도 5.0(%/min)에서의 10% 변형률의 축차응력은 약 137kPa 이며, 5.0(%/min)에서의 10% 변형률의 과잉간극수압은 97kPa로 40kPa의 유효응력의 증가가 발생함을 알 수 있다. 위의 분석에서 알 수 있듯이 전단속도 0.1(%/min)에 비해 5.0(%/min)가 MG1의 전단강도를 과대하게 평가됨을 알 수 있다. 다시말해서, 이론적인 비배수거동에 근접한 비배수전단강도를 얻기 위해서는 0.1(%/min)가 5.0(%/min)보다 적합함을 알 수 있다. MG2, MG3, MG4의 결과도 MG1의 결과와 유사한 경향을



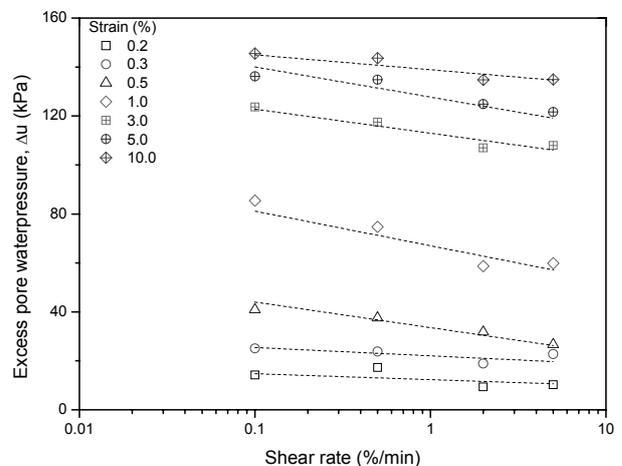
(a) MG1



(b) MG2



(c) MG3



(d) MG4

그림 4. 전단속도와 과잉간극수압의 관계

보인다. 본 연구에 사용된 결과를 보면 재생성된 광양점토의 비배수전단강도를 얻기 위해서는 약 1(%/min)의 전단속도가 적합할 것으로 판단된다.

3.3 변형률 거동

그림 5에 나타난 바와 같이 등변형률선의 기울기 α 는 전단속도가 증가함에 따라 축차응력이 증가하는 양의 기울기를 가지며, 특히 축변형률 약 1%에 도달하면 α 가 거의 일정해지는 경향을 보인다. Akai 등(1974)은 일본점토를 대상으로 한 시험결과에서 그 값이 12.8kPa에 근접한다고 하였으며, 정진섭(1983)은 무안지역의 재생성 점토를 대상으로 한 시험결과에서 그 값이 17.7kPa에 수렴함을 보고하였다. 그러나 그림 5에 나타난 바와 같이 본 연구에서 광양지역의 재생성 점토를 대상으로 한 실험결과에 의하면 그 값이 15.7~21.6kPa 정도의 값을 보이고 있는데, 이러한 결과는 $\alpha(\epsilon_1)$ 값이 모든 점성에 대하여 동일한 값을 보이는 것이 아니라

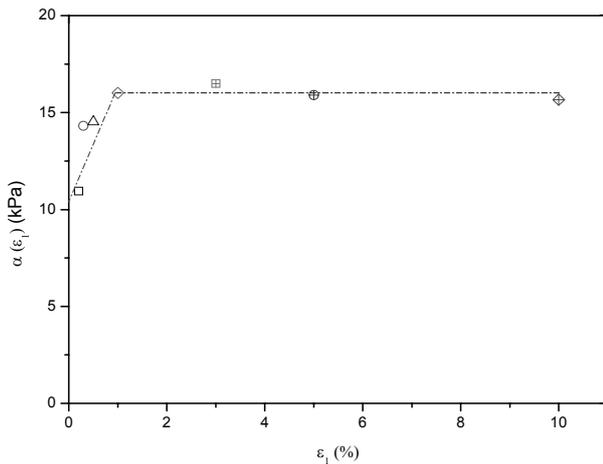
표 3. 소성지수 변화에 따른 $\alpha(\epsilon_1)$ 값

Sample	소성지수 (%)	$\alpha(\epsilon_1)$ * (kPa)	USCS
MG1	54.57	16.02	CH
MG2	24.81	21.60	CH
MG3	14.47	19.74	CL
MG4	9.60	14.47	ML

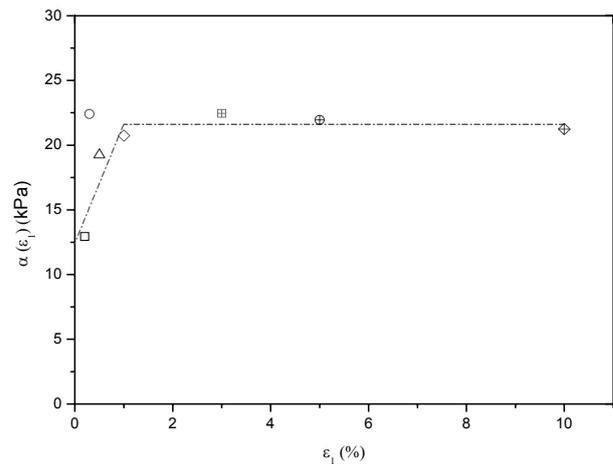
*는 그림 5에서 기울기의 변화가 없는 구간의 값임.

시료의 종류 및 특성에 따라 차이를 보이는 흙 고유의 특성 값이라 판단된다.

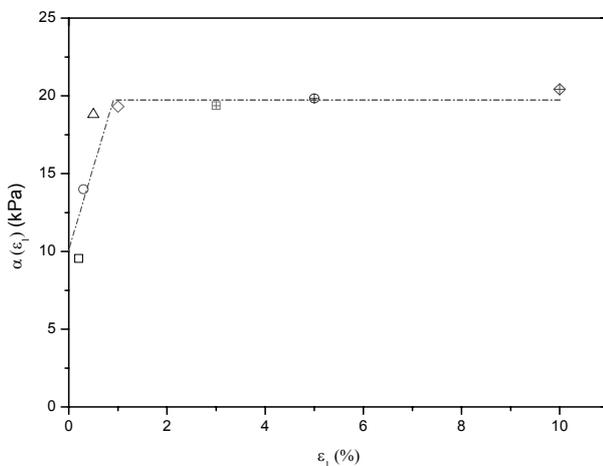
또한 표 3에 나타난 바와 같이 $\alpha(\epsilon_1)$ 값이 소성지수에 따라 다르게 나타남을 알 수 있으며, 특히 고소성 시료(MG1, MG2)에서는 소성지수가 감소할수록 $\alpha(\epsilon_1)$ 값이 증가하지만, 저소성 시료(MG3, MG4)에서는 소성지수가 감소함에 따라 $\alpha(\epsilon_1)$ 값이 감소하며, 이는 소성지수가 $\alpha(\epsilon_1)$ 값에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나인 것으로 판단된다.



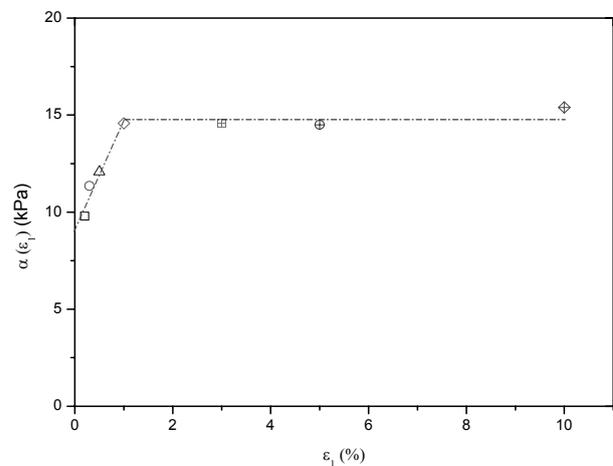
(a) MG1



(b) MG2

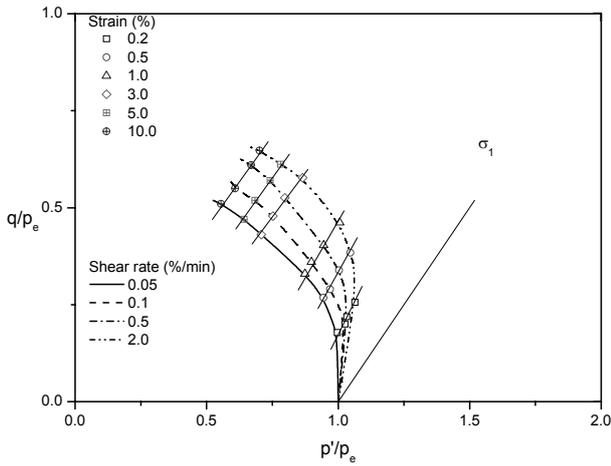


(c) MG3

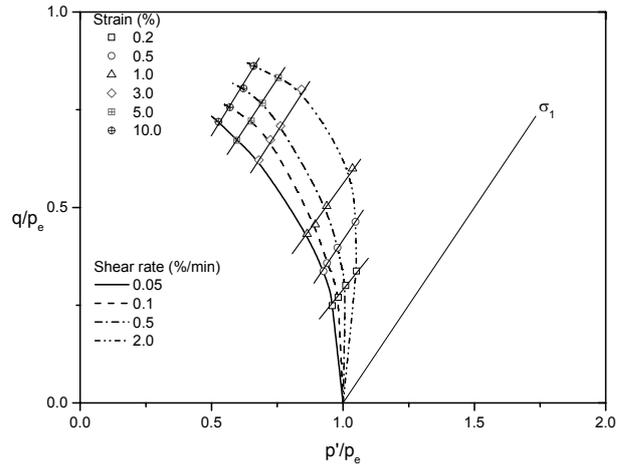


(d) MG4

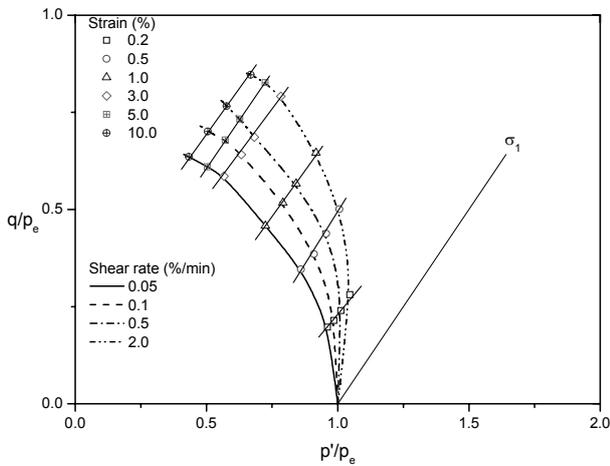
그림 5. 축변형률과 등변형률선 기울기의 관계



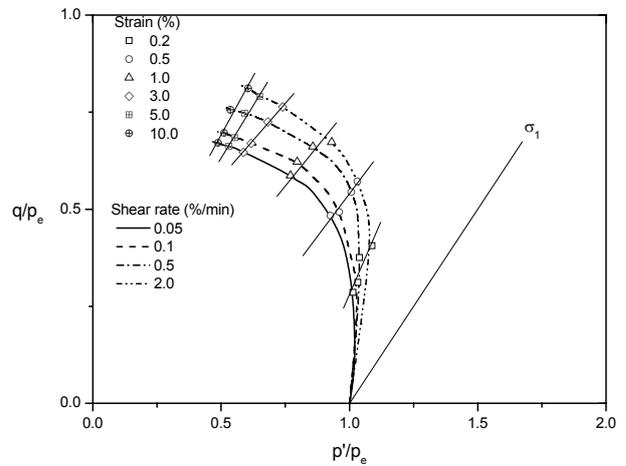
(a) MG1



(b) MG2



(c) MG3



(d) MG4

그림 6. 전단속도에 따른 유효응력 경로

3.4 응력경로

동일한 시료에 대하여 전단속도를 달리한 압밀비배수 시험의 유효응력경로는 그림 6에 나타난 바와 같으며, 모든 시료에서 동일 변형률을 연결한 등변형률선이 대부분 최대 주응력축과 평행을 이루고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Lo(1969)의 연구결과처럼 전단속도가 간극수압에 영향을 미치지 않는다는 점을 증명하는 결과이다.

4. 결 론

재생성 광양점토를 이용하여 실트 함유율이 다른 4종류의 시료를 제작한 다음, 이를 대상으로한 전단 시 시간효과를 파악하기 위하여 완속재하 상태부터 급속재하 상태까지를 모사한 0.1~5%/min의 전단속도로 일정변형률 전단시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

- (1) 전단속도(shear rate)의 변화에 따른 축차응력의 거동은 전단속도가 증가할수록 축차응력도 동시에 증가하는 것으로 나타났으며, 등변형률에서 축차응력의 변화는 양의 기울기를 가지는 직선 형태로 나타난다.
- (2) 전단속도가 서로 다른 시료의 등변형률선을 연결한 직선의 기울기는 약 1% 정도의 축변형률까지는 증가하는 경향을 보이다가, 1% 이상의 축변형률에서는 전단속도가 증가하더라도 기울기의 변화는 없는 것으로 나타났다. 그리고 기울기의 변화가 없는 지점의 $\alpha(\epsilon_1)$ 값은 15.7~21.6kPa 정도의 값을 보이며, 이 값은 흙이 가지는 고유 특성인 것으로 판단된다.
- (3) 소성지수 변화에 따른 $\alpha(\epsilon_1)$ 의 거동은 고소성 시료에서는 소성지수가 감소할수록 $\alpha(\epsilon_1)$ 값이 증가하지만, 저소성 시료에서는 소성지수가 감소할수록 $\alpha(\epsilon_1)$ 값이 감소하는 경향을 보이며, 이는 $\alpha(\epsilon_1)$ 값과 소성지수의 관계가 다짐곡선과 유사한 상관관계를 보임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 문경록(1999), 전단속도 및 포화도가 다짐화강토의 전단정수에 미치는 영향, 석사학위논문, 전남대학교, pp. 24~73.
2. 이진수(1983), 포화점토의 변형에 있어서 시간의존성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 전남대학교, pp. 23~29.
3. 정진섭(1983), 포화점토의 응력 변형률에 관한 연구, 박사학위논문, 전남대학교, pp. 44~50.
4. Akai, K., Adachi, T. and Ando, N.(1974), A Stress-strain Time Relation of Saturated Clays, *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 225, pp. 53~61.
5. Akai, K., Adachi, T. and Ando, N.(1975), Existence of a Unique Stress-strain-time Relation of Clays, *Soils and Foundations*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~16.
6. Lo, K. Y.(1969), The Pore Pressure-strain Relationship Normally Consolidated Undrained Clays, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 383~412.
7. Murayama, S., Sekiguchi, H. and Ueda, T.(1974), A Study of the Stress-strain-time Behaviour of Saturated Clays Based on a Theory of Nonlinear Viscoplasticity, *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, pp. 19~33.
8. Young, R. N. and Japp, R. D.(1969), Stress-strain Behaviour of Clays in Dynamic Compression, *Vibrational Effects on Earthquakes on Soils and Foundations*, American Society for Testing and Materials, STP 450, pp. 233~262.

(접수일: 2010. 9. 6 심사일: 2010. 9. 15 심사완료일: 2010. 11. 16)