

K₀ 압밀 점토의 변형을 의존 비배수 전단거동 Undrained Behavior of K₀ Consolidated Clay due to Strain Rate

김진원¹⁾, Jinwon Kim, 이창호²⁾, Changho Lee, 이문주³⁾, Moonju Lee, 이우진⁴⁾, Woojin Lee

¹⁾ (주)시원ENC, 상무, Managing Director, Siwon ENC co. LTD

^{2),3)} 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

⁴⁾ 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea University

SYNOPSIS : After clay particles have been sediment isotropically, the clay deposits have been consolidated under K₀-stress system. Therefore, in order to predict the behavior in-situ of normally consolidated clays, the laboratory test should be enforced under K₀-stress system and should obtain the characteristics of normally consolidated clays.

And relationship of stress-strain on clay is effected on not only method of consolidation but also characteristic of visco-plastic behavior. Saturated clay is effected more this trend. So, rate of strain is considered to understand exact stress-strain relationship.

In this study, the series of undrained triaxial compression tests were preformed on remolded specimens which was made by slurry of clay, consolidated under K₀-stress systems. And the undrained triaxial compression test were preformed to examine behavior of stress-strain relationship due to rate of shear strain

Key words : Triaxial test, K₀ consolidation, Strain rate dependent behavior,

1. 서 론

점토입자가 자연스러운 퇴적 과정을 거쳐 점토지반을 형성하는 경우 1차원적 퇴적과 중력의 작용으로 점토입자의 수평적 배열이 발생하여 고유이방성이 나타나며, 이후 지반의 응력상태는 정지토압상태인 K₀상태로 압밀이 진행되어 응력유도이방성(stress induced anisotropy)이 발생한다. 이와 같이 점토지반의 응력상태는 등방응력상태가 아니라 이방응력상태에 있다는 것이 Ladd(1965) 등의 연구결과를 통해 알려져 있다.

따라서 점토지반의 응력-변형을 관계 등의 강도 및 거동특성을 구하기 위해 실시하는 삼축전단시험도 실제 현장과 동일한 K₀응력상태를 재현하여 시험하는 것이 합리적이거나 시험의 용이함과 경제성 등의 이유 및 전단저항각은 압밀방법에 크게 영향을 받지 않는다는 기존의 연구결과 (Ladd, 1982; Ladd,1985) 때문에 등방응력상태로 시험한 결과를 통해 내부마찰각 등의 전단강도정수를 구하고 있는 실정이다.

내부마찰각 등의 포화점토지반의 전단특성이 압밀방법에 영향을 받지 않는지의 여부에 관하여는 찬반의 연구가 계속되고 있지만 기존의 연구결과 (Mayne, 1985; Sivakugan, Holtz & Chameau, 1988)에 의하면 등방압밀 삼축시험에서 구한 전단특성은 이방압밀 삼축시험에서 구한 전단특성과 차이가 있는 것으로 밝혀졌으며, 특히 응력-변형을 거동특성은 등방압밀과 이방압밀 조건에 따라 큰 차이를 보이고

있기 때문에 점토지반의 응력-변형률 거동특성을 이해하기 위해서는 현장의 응력상태와 유사한 K_0 응력 상태로 시험하는 것이 필요하다.

또한 점토의 응력-변형률 관계는 압밀방법 뿐만 아니라 시간에 따라 영향을 받는 점소성의 성질을 갖고 있다. 동일한 초기응력상태에서 변형률 속도를 다르게 할 경우 상이한 거동을 나타내며 이러한 경향은 포화된 점토지반의 경우 더 큰 영향을 갖는 것으로 알려져 있기 때문에 응력-변형률-강도특성을 정확히 이해하기 위해서는 변형률 속도에 대한 영향을 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 슬러리 상태의 점토시료를 공시체 제작 장치에서 제작한 후 자연지반과 유사한 상태를 재현하기 위해 삼축셀(Triaxial Cell)에서 K_0 응력상태로 압밀시킨 후, 변형률 속도를 달리하면서 전단시험을 실시하여 변형률속도에 따른 응력-변형률 거동 특성을 규명하고자 한다.

2. 흙 거동의 이방성 및 변형률 속도 의존성

2.1 흙의 이방성

자연 상태에 존재하는 흙은 퇴적 조건과 응력 이력에 따라 토립자 배열과 입자 상호관계에 특정한 방향성을 띠는 입자배열의 이방성 또는 흙의 구조 이방성(fabric anisotropy)을 가지며, 강도 및 변형 성질을 통해 이방성을 나타낸다.

Casagrande와 Carillo(1944)에 의해 흙의 강도 이방성이 모델링 된 이후, 흙의 이방성은 Duncan&Seed(1966)에 의해 고유 이방성(inherent anisotropy)과 응력유도이방성(stress induced anisotropy)으로 구분하였다.

고유이방성(inherent anisotropy)이란 흙 구조(soil fabric)의 차이에 의해 발생하는 이방성이며, 이는 흙이 퇴적될 당시에 특정한 방향성을 가지면서 퇴적되기 때문에 발생하는 이방성이다. 따라서 고유이방성은 흙이 하중을 받아서 변형되기 이전부터 발휘하게 되는 이방성이며 대부분의 흙은 고유이방성을 띠게 된다.

사질토는 점성토와 달리 표면에 띠고 있는 전기적 힘이 적기 때문에 퇴적될 때 입자 간에 작용되는 전기적 상호작용 보다는 입자에 작용하는 중력의 영향에 의해서 흙 입자의 거동이 결정된다. 또한, 자연 상태의 사질토 입자는 완전한 구체(球體)가 아니기 때문에 퇴적당시에 이미 부분적 또는 전체적으로 토립자가 횡방향으로 배열되는 이방성을 띠게 된다.

Mahmood & Mitchell (1974)는 파쇄 된 현무암을 이용하여 전단 상자(shear box)에 성형된 공시체를 사용하여 고유이방성이 전단강도에 미치는 영향에 대한 시험결과 주방향성(preferred orientation)을 띠는 면에 직각으로 전단되는 경우의 강도가 평행으로 전단되는 경우보다 큰 경향을 뚜렷하게 보이며 그 차이는 상대밀도가 클수록 작아진다고 보고하였다. 이처럼 고유이방성은 주방향성을 띠는 면에 하중이 작용하는 방향에 따라 강도의 차이를 유발하게 되며 그 영향은 느슨한 사질토 일수록 크게 작용한다.

응력유도이방성이란 흙이 퇴적된 이후 하중을 받으면서 발생하는 후천적인 이방성을 말한다. 즉, 흙 입자들이 퇴적된 이후 받게 되는 응력체계가 변화하게 되면 흙 입자들은 가해지는 주응력에 가장 잘 저항할 수 있는 구조로 배열을 바꾸게 되며, 압밀응력비($K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$), 중간주응력 및 중간 주응력의 회전 등으로 인하여 퇴적당시에 발달되었던 구조가 새로운 응력체계에 의해 변화하게 된다. 이로 인해 비배수상태에서 가해지는 전단응력에 의해 발생 되는 과잉간극수압은 흙 입자의 배열에 따라 달라지며, 발생하는 과잉간극수압의 크기의 차이는 유효응력의 차이를 가져오게 된다. 따라서 이방압밀 상태에 있는 공시체는 등방압밀 상태에 있는 공시체와는 다른 전단강도의 특성을 나타내게 된다. 이러한 흙 구조의 이방성은 흙의 역학적 성질에 대한 이방성을 가져오는 원인이며, 자연 상태의 지반은 퇴적될 당시 고유이방성뿐만 아니라 K_0 이방압밀상태가 추가적으로 가해져 이로 인해서 발생된 응력 유도 이방성을 포함한 복합이방성(combined anisotropy)을 가지고 있기 때문에 실험실 시험에서 현장조건에 맞는 압밀응력상태를 고려하여야 한다.

2.2 점토 거동의 변형율속도 의존성

점토의 응력-변형율 거동의 변형율속도 의존성은 많은 학자나 기술자들이 인정하고 있다. (Casagrand & Wilson, 1951 ; Crawford, 1959 ; Richardson & Whiteman, 1963) 이러한 변형율속도 의존성은 점토 지반위에 구조물을 축조하는 경우가 많아짐에 따라 최근 더 많은 관심을 받아오고 있다.

비배수전단강도에 대한 변형율속도 영향의 중요성은 Bjerrum(1973)에 의해 발표되었으며, 그는 현장 배인강도는 실제 크기의 제방재하상태와 배인시험 사이의 파괴까지 도달하는 시간 차이를 나타내는 전단속도의 영향을 고려하여 소성지수와 관련된 보정인자(Correction factor)를 제안하였다.

또한 Richardson & Whiteman(1963), Alberro & Santoyo(1973), Vaid & Campanella(1977) 등에 의한 초기 연구는 변형율속도가 증가할수록 비배수전단강도가 증가한다는 것을 명확하게 증명하였으며 Vaid는 Saint-Jean-Vianney clay로 시험하여 전단속도가 10배 증가하면 비배수강도가 5~10%증가한다는 연구결과를 발표하였다.

Graham은 소성지수가 큰 자연점토에 대한 시험결과 변형율속도 10배 변화 시 약 9~20%의 비배수 전단강도의 증가를 발표하였다. 그는 변형율속도에 따른 비배수전단강도의 변화를 나타내는 변형율속도 매개변수 $\rho_{0.1}$ 을 제안했다. 매개변수 $\rho_{0.1}$ 은 변형율속도가 10배 변화할 때 비배수 전단강도의 변화를 나타내며 $0.1\%/h$ 변형율속도에서 측정된 전단강도의 백분율로서 표현된다.

이와 유사하게 Sheahan et al(1996)은 더 일반적인 변형율속도변수 $\rho_{\epsilon'_{ao}}(\%)$ 를 소개하였다.

$$\rho_{\epsilon'_{ao}} = \frac{\frac{\Delta S_u}{S_{uo}}}{\Delta(\log \epsilon'_a)} \times 100 \quad (1)$$

여기서 S_{uo} 는 비배수전단강도 기준값이며 이는 기준변형율속도 ϵ'_{ao} 에서의 비배수전단강도 S_u 이다. 그리고 ΔS_u 는 log축적인 전단 변형율속도 증가에 대응하는 비배수전단강도의 증가분이다. 즉 $\Delta(\log \epsilon'_a)$ 에 대한 $\Delta S_u = S_u - S_{uo}$ 이다.

3. 실내 시험 계획

3.1 시료 및 공시체 준비

기존의 대부분의 연구결과는 자연지반의 공시체에 대하여 수행되었다. 시험결과의 정확한 비교를 위해서는 공시체의 균질성과 동질성이 무엇보다도 중요하나 자연지반의 경우 점토지반이 오랜 시간동안 다른 환경에서 퇴적되어 생성되었기 때문에 이와 같은 조건을 만족시킬 수 없다고 판단하여 본 연구에서는 분말상태의 점토시료를 이용 슬러리 상태에서 압밀시켜 삼축시험용 공시체를 제작하였다.

공시체제작을 위해 분말형태의 점토시료는 GF 1250(Kaolinite 100%)를 사용하였으며, 점토시료의 입도분포와 기본 물성치는 각각 표 1, 2 및 그림 1과 같다. 공시체제작을 위해 분말상태의 점토시료를 액성한계의 약 2배인 140%의 고탍수비로 슬러리로 만든 후 직경 7cm의 공시체 제작 장치에서 사하중을 이용하여 120Kpa로 압밀시켰다. 점토시료는 노건조 시킨 후에 공시체를 제작할 경우 물속에서 스스로 부서지는 현상이 나타나는 등 시료의 성질이 완전히 달라지기 때문에 자연건조상태의 분말점토를 그대로 사용하였으며, 시료교반장치로 2시간 이상 교반 후 24시간 방치시켰다가 공시체 제작 장치에 넣기 전에 다시 30분 정도 교반시켜 시료 내부의 공기가 가능한 적도록 하였다. 또한 재하시간간격을 동일하게 하여 제작된 시료의 함수비가 57%내외의 비교적 균일한 시료를 제작 시험에 사용하였다.

표 1. GF 1250의 기본 물성치

구 분	비 중	Atterberg Limit	
		액성한계 (LL)	소성한계 (PL)
Kaolinite	2.54	67.15	30.75

표 2. GF 1250의 XRD 분석 결과

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O
47.145	35.579	1.076	0.742	0.282	0.234
MgO	CaO	P ₂ O ₅	MnO	L.O.I	Total
0.200	0.058	0.005	0.003	14.469	99.793

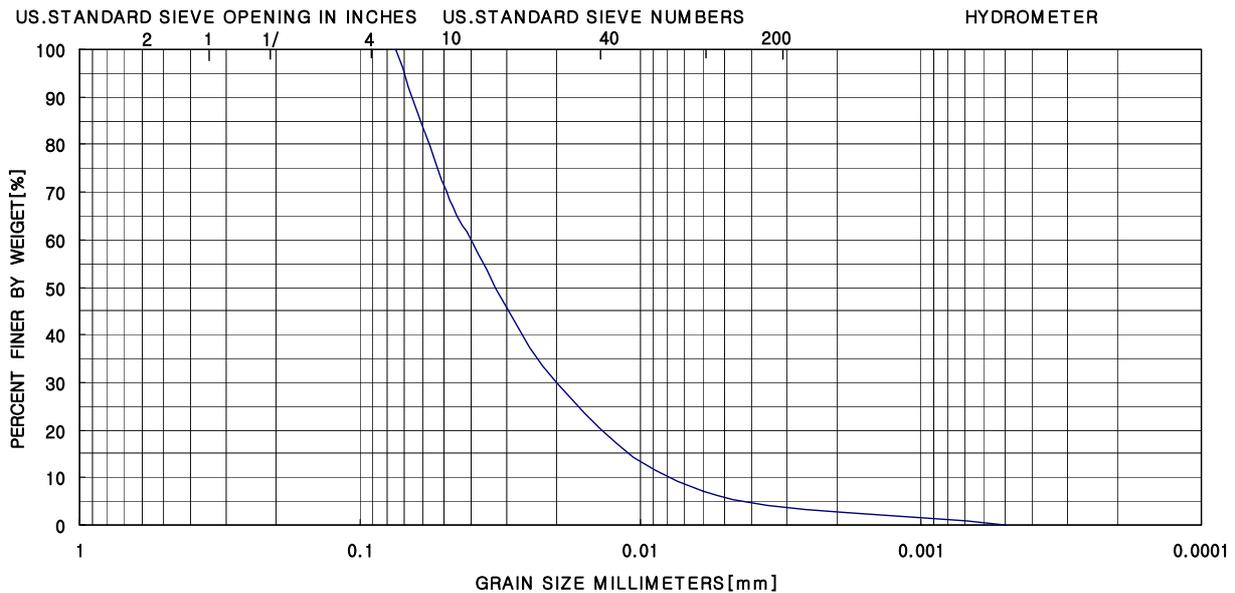


그림 1. GF 1250의 입도분포 곡선

3.2 시험 장비 및 시험 계획

본 연구에 사용된 삼축시험기는 C. K. Chan이 개발한 자동화 삼축시험기로 압력과 변위 및 체적변화를 5개의 Transducer (Load cell, LVDT, Chamber Pressure, Effective Pressure, Volume Change)로 측정하여 컴퓨터로 자료를 자동 저장시키고 컴퓨터에서 압력을 조절하여 구속압과 축차응력을 제어하는 자동화 시스템으로 이 시험기는 등방, 비등방 및 K₀압밀을 수행하여 배수와 비배수조건으로 정적 및 동적전단을 시킬 수 있고 응력제어와 변형을 제어가 가능하다. 이 자동화 삼축시험기는 컴퓨터에서 발생한 전기신호를 process interface의 D-A converter를 통해 아날로그 신호로 바꾸고 컴퓨터로 보내어 자료를 저장한 후에 다시 신호를 보내어 제어한다.

공시체는 직경 7cm, 높이 14cm (L/D=2.0) 크기의 원통형으로 공시체 제작 장치의 직경과 같기 때문에 공시체 제작 장치에서 꺼낸 후 시료의 상·하면 만을 성형하여 공시체를 삼축셀 안에 거치하였다. 또한 K₀ 압밀 시 측면배수를 위해 일정 간격의 홈을 뚫은 필터페이퍼를 사용하였다. 모든 공시체는 K₀ 압밀 시험 전 15Kpa의 진공압으로 예비 포화 후 배압포화(Back pressure saturation) 방법으로 포화시켰다. Back pressure는 150Kpa~200Kpa를 적용하였으며 모든 시료의 "B" 값은 0.98이상을 확인하였다.

K₀ 압밀법에는 응력제어방법과 변형율제어방법이 있으며, 각각의 경우 응력증분속도 또는 변형율속도를 결정해야 하고, 또한 최종압밀응력 도달 직후에는 아직 압밀이 완료되지 않았으므로 압밀이 완료될

때까지의 하중유지 기간을 결정하여야 한다. 국내외의 연구결과에서는 하중유지기간에 대해서는 정확한 언급이 없고 응력증분속도 및 변형율속도에 대해서는 홍원표 등 (1987)은 응력제어방법으로 응력증분속도를 0.1Kpa/min으로 하였으며, Sheahan은 변형율 제어방법으로 0.1%/h로 압밀을 수행하였다.

본 시험에서는 응력제어방법을 이용, 0.1Kpa/min, 0.167Kpa/min, 0.333Kpa/min의 응력증분속도로 100Kpa, 200Kpa, 300Kpa의 최종압밀응력까지 K_0 압밀을 수행하였다. 응력증분속도와 함께 최종압밀응력의 결정도 K_0 압밀을 수행하면서 결정해야할 과제이나, 최종압밀응력의 유지기간의 결정은 참고문헌이나 특별한 규정을 구할 수 없었기 때문에 본 시험에서는 배수량의 변화가 거의 없는 10시간의 하중유지 기간을 설정하였다. K_0 압밀 종료 후 0.5%/min, 0.05%/min, 0.005%/min의 변형율속도로 전단시험을 수행하였다. 압밀 완료 후 전단시험 직전에도 B값을 측정하였으며, 0.97이상의 값을 확인하였다.

표 3. 시험계획

구 분	1차원 압밀압력	K_0 압밀 시 수직 응력	변형속도	
			K_0 압밀 (Kpa/분)	전단 (%/min)
Kaolinite 100% 시료	120Kpa	100Kpa	0.100	0.5
		200Kpa	0.167	0.05
		300Kpa	0.333	0.005

4. 실험결과 및 토론

4.1 K_0 압밀 거동

4.1.1 시간- K_0 관계

각각의 응력증분속도에 대해 K_0 값은 하중 재하 직후 빠르게 증가한 후, σ'_1 이 약 40Kpa~50Kpa부근까지는 감소하다가 이후 최종압밀응력까지 서서히 증가하여 표 4와 같이 일정한 값($(K_0)_{100Kpa} = 0.45 \sim 0.47$, $(K_0)_{200Kpa} = 0.48 \sim 0.52$, $(K_0)_{300Kpa} = 0.49 \sim 0.55$)에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 최종압밀응력 이후 하중유지기간동안에는 K_0 값이 일정한 경향을 보이지 않고 각각의 다른 경향을 나타내었다.

4.1.2 σ'_1 -체적변형을 관계

σ'_1 -체적변형을 관계는 그림 2와 같이 압밀응력이 작은 초기에는 작은 체적변형을 증가량을 보이다 σ'_1 이 약 50Kpa를 지나면서 체적변형 증가 속도가 커지는 경향을 보인다. 이후 150Kpa 근처에서 체적변형을 증가속도는 줄어들어 200Kpa를 지나면서 증가속도는 더욱 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이는 선형압밀응력보다 훨씬 작은 압력에서는 공시체가 과압밀상태에 있기 때문에 체적변형율이 작게 발생되며, 선형압밀압력(120Kpa)을 지나면서 체적변형율이 증가하는 것으로 판단된다. σ'_1 축을 log축으로 바꾸면 그림 3과 같이 공시체제작시의 압밀압력 부근인 100Kpa 이후에는 직선관계를 보이고 있으며, 이는 Terzaghi의 1차원압밀침하량 관계식과 부합하는 것을 알 수 있다.

4.1.3 압밀속도-체적변형을 관계

각각의 K_0 압밀응력에 따른 변형속도, 체적변형을 및 최종압밀응력 도달 직후 K_0 값을 표 4에 나타내

었다. 표 4에서 볼 수 있는 바와 같이 K_0 압밀 종료 직 후의 체적변형율은 K_0 압밀응력 100Kpa의 경우 3.57~3.8%, 200Kpa의 경우 9.0~11.3% 그리고 300Kpa의 경우 9.7~13.5.8%로 나타났다.

또한 체적변형율은 K_0 압밀 변형 속도의 차이에도 불과하고 200Kpa의 경우 11.3% 및 10.3%, 300Kpa의 경우 13.5% 및 13.2%로 유사한 값을 보인다. 압밀속도가 실험결과에 영향을 준다면 응력증분속도가 빠른 압밀의 경우가 더 많은 체적변형량을 보여야 하며, 최종 10,000초 동안에 발생하는 체적 변형량도 더 크게 발생되어야 함에도 거의 같은 결과를 보이는 것을 감안하면 압밀 시 응력증분속도는 실험결과에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

최종 방치기간 중 체적변형량은 최종압밀응력 작은 100Kpa의 경우가 최종압밀응력 더 큰 300Kpa의 경우가 더 크다는 점도 특이한 점이다. 이는 압밀응력이 작을수록 2차압밀침하량과 1차압밀침하량의 비가 크다는 기존의 연구결과를 보여주는 것으로 보인다.

표 4. K_0 압밀시험 결과

K_0 압밀응력 (Kpa)	공시체번호	변형속도 K_0 압밀 (Kpa/분)	체적변형율(%)		최종압밀응력 도달직후 K_0	최종 10,000초 동안의 발생체적변형량
			K_0 종료직후	10시간 방치후		
100	S-100-0.5-1	0.333	3.57	4.7	0.45	0.08
	S-100-0.5-2	0.333	3.90	5.1	0.47	0.06
	S-100-0.05	0.333	3.80	5.0	0.45	0.12
200	S-200-0.5	0.333	10.00	10.9	0.48	0.04
	S-200-0.05-1	0.167	11.30	12.8	0.52	0.07
	S-200-0.05-2	0.333	10.30	11.3	0.51	0.06
	S-200-0.005	0.333	9.00	10.0	0.48	0.08
300	S-300-0.5	0.333	9.66	10.8	0.49	0.04
	S-300-0.05	0.333	13.30	14.2	0.50	0.04
	S-300-0.005-1	0.333	13.50	14.2	0.50	0.04
	S-300-0.005-2	0.100	13.20	14.1	0.49	0.05

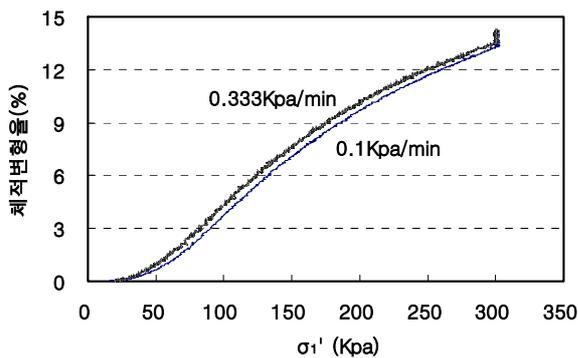


그림 2. σ_1' -체적변형율 관계

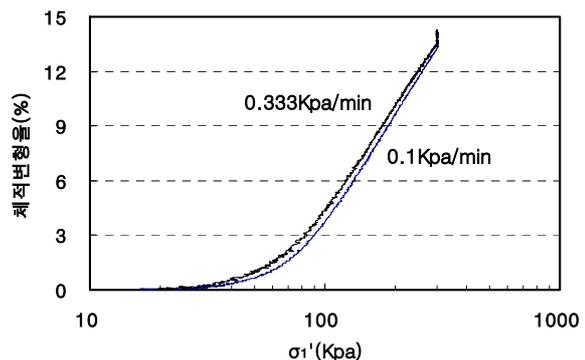


그림 3. $\log \sigma_1'$ -체적변형율 관계

4.2 비배수전단시험

전단시험은 변형율제어 방법으로 실시하였으며, 100Kpa, 200Kpa, 300Kpa로 K_0 압밀시킨 공시체를 0.5%/min, 0.05%/min, 0.005%/min의 변형율속도로 전단시험을 수행하였다. K_0 압밀완료 후 전단시험

직전에도 “B”값을 측정하였으며, 0.97이상의 값을 확인하였다.

5.1 변형율속도에 따른 전단강도 특성

변형율 속도에 따른 전단강도 특성은 그림 4 및 표 5와 같다. 기존의 연구결과와 같이 변형율속도가 증가함에 따라 증가하는 것이 명확하게 나타나며, 변형율속도가 각각 10배의 증가를 보이는 0.005%/min에서 0.05%/min로 될 경우 $\sigma_{dmax}/\sigma_{vc}$ 가 평균 4.6%증가하고, 변형율속도가 0.05%/min에서 0.5%/min로 될 경우에는 평균 8.8%증가한다.

그러나 그림 4에 나타난 것처럼 변형율속도에 따른 응력-변형율 거동특성은 0.5%/min 및 0.05%/min의 경우 재하 직후부터 축차응력이 빠르게 증가하는 응력경화현상(Strain hardening)이 발생하면서 변형율 0.2~0.3% 부근에서 최고치인 σ_{dmax} 에 도달한 후 서서히 축차응력이 감소하는 일반적 응력-변형율의 관계를 보이는 반면, 변형율속도가 작은 0.005%/min의 경우는 재하 직후 0.5%/min 및 0.05%/min의 경우와 동일하게 축차응력이 빠르게 증가하는 것은 같은 경향을 보이나 이후 응력연화현상(Strain softening)이 발생하지 않고 약 6%정도의 변형율까지 미세하게나마 지속적으로 축차응력이 증가하는 응력경화현상(Strain hardening)이 발생하는 것이 다른 시험결과와는 다른 특징을 보인다. 이의 원인은 점토시료의 점·소성적 영향으로 판단된다. 변형율속도가 클 경우 점·소성의 영향을 받기 전에 σ_{dmax} 에 도달한 후 파괴면의 발달에 따른 응력연화현상이 발생하는 반면에 변형율속도가 작을 경우 초기에는 급한 응력경화현상(Strain hardening) 이후 점·소성의 영향이 커지기 때문에 매우 완만하고 지속적인 응력경화현상을 보이는 것으로 판단된다.

표 5. 변형율 속도에 따른 최대 축차응력비

구분		변형율속도(%/min)		
		0.005	0.05	0.5
$\sigma_{dmax}/\sigma_{vc}$	$\sigma_{vc}=100\text{Kpa}$	0.70	0.74(5.7%)	0.79(6.8%)
	$\sigma_{vc}=200\text{Kpa}$	0.64	0.67(4.7%)	0.73(9.0%)
	$\sigma_{vc}=300\text{Kpa}$	0.62	0.64(3.2%)	0.7(9.4%)
평균		0.65	0.68(4.6%)	0.74(8.8%)

()는 변형율속도가 10배 커질 경우 $\sigma_{dmax}/\sigma_{vc}$ 의 증가율

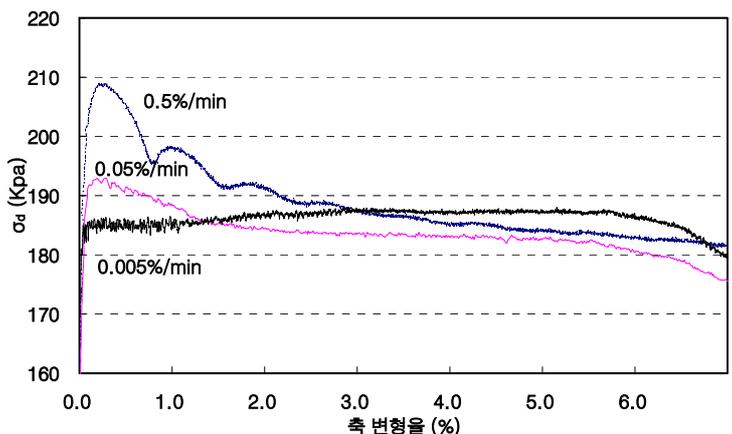


그림 4. 변형율 속도에 따른 응력-변형율 관계

5. 결론

K_0 압밀 점토의 변형률 속도가 비배수 전단강도에 미치는 영향을 알기 위하여 변형률 속도를 달리 하여 시행한 비배수 삼축압축시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 체적변형률은 K_0 압밀 변형률 속도의 차이에도 불과하고 200Kpa의 경우 11.3% 및 10.3%, 300Kpa의 경우 13.5% 및 13.2%로 유사한 값을 보인다. 압밀속도가 실험결과에 영향을 준다면 응력증분속도가 빠른 압밀의 경우가 더 많은 체적변형률을 보여야 하며, 최종 10,000초 동안에 발생하는 체적변형률도 더 크게 발생되어야 함에도 거의 같은 결과를 보이는 것을 감안하면 압밀 시 응력증분속도는 실험결과에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

2. 최종 방치기간 중 체적변형률은 최종압밀응력 작은 경우가 더 크다. 이는 압밀응력이 작을수록 2차압밀침하량과 1차압밀침하량의 비가 크다는 기존의 연구결과를 보여주는 것으로 보인다.

3. 기존의 연구결과와 같이 변형률속도가 증가함에 따라 증가하는 것이 명확하게 나타난다. 변형률속도가 각각 10배의 증가를 보이는 0.005%/min에서 0.05%/min로 될 경우 $\sigma_{dmax}/\sigma_{vc}$ 가 평균 4.6%증가하고, 변형률속도가 0.05%/min에서 0.5%/min로 될 경우에는 평균 8.8%증가한다.

4. 변형률속도에 따른 응력-변형률 거동특성은 0.5%/min 및 0.05%/min의 경우 재하직후부터 축차응력이 빠르게 증가하는 응력경화현상(Strain hardening)이 발한 후 변형률 0.2~0.3% 부근에서 최고치에 도달한 후 축차응력이 감소하는 응력연화현상(Strain softening)을 보이는 반면, 0.005%/min의 경우는 재하직후 축차응력이 빠르게 증가하는 것은 같으나 이후 응력연화현상(Strain softening)없이 약 6% 변형률까지 미세하게나마 축차응력이 증가하는 응력경화현상(Strain hardening)이 발생하는 것이 다른 시험결과와는 다른 특징을 보인다.

참고문헌

1. Alberro, J. and Santoyo, E.(1973), "Long term behavior of Mexico City clay", *Proc of 8th Inter. Conf. on Soil Mech and Found. Eng*, Vol. 1, pp.1~9
2. Casagrande, A. and Wilson, S .D.(1951), "Effect of rate of loading on the strength of clays and shales at constant water content", *Geotechnique*, Vol. 2, No. 2, pp.251~263
3. Duncan, A.M. and Seed, H.B.(1966), "Anisotropy and stress reorientation in clay", *J. SMFD*, ASCE, Vol. 89, No.SM6, pp.21~50
4. Graham, J., Crooks, J.H.H, and Bell, A.L(1983), "Time effects on the stress-strain behavior of natural soft clays", *Geotechnique*, Vol. 33, No. 3, pp.327~340
5. Lade, P. V. and Musante, H. M.(1976), "Three-Dimensional Behavior of Normally Consolidated Cohesive Soil", *Report No. UCLA-ENG-76-26*, UCLA
6. Lade, P. V. and Tsai, J. I.(1985), "Effects of Localization in Triaxial Tests on Clay", *Proc of 11th Inter. Conf. on Soil Mech and Found. Eng*, San Francisco, Vol. 2, pp.549~552
7. Mayne, P.W. and Stewart, H.E.(1988), "Pore pressure behavior of K_0 -consolidated clays", *J. GED*, ASCE, Vol. 114, No.11, pp.1340~1346
8. Sivakugan, N., Holts, R.D. and Chameau, J.L.(1988), "CK₀UC shear strength of normally consolidated clays from CIUC tests", *J. GED*, ASCE, Vol. 114, No. GT3, pp.284~295
9. 강병희, 윤호창(1994), "정규압밀점토의 비배수 전단강도에 대한 이방압밀효과", *한국지반공학회지*, 제 10권, 제 1호, pp.63~70.
10. 홍원표(1987), "정규압밀점토의 거동에 미치는 K_0 압밀효과", *대한토목학회논문집*, 제7권, 제 3호, pp183~193