

고온이력을 받는 점토의 압밀 및 전단특성

Consolidation and Strength Properties of Clay Subjected to High Temperature Histories

이 강 일 Lee, Kang-Il

Abstract

Recently, ground has been often exposed to high temperature environments such as chemical ground improvement, thermal energy storage system, and underground nuclear waste disposal system. Since the behavior of clay is sensitive to temperature change, the studies on the engineering properties of clay subjected to high temperature history may be important. This paper presents the mechanical behavior of clay with high temperature condition. \overline{CU} tests using a high temperature and pressure triaxial compression test apparatus were carried out in order to investigate characteristics of deformation, shear strength, compression and consolidation of clay. During tests, the temperature was varied from 20°C, 50°C, 75°C, 80°C to 100°C.

요 지

점토의 거동은 온도변화에 민감하기 때문에 고온이력을 받는 점토의 공학적 성질에 관한 연구가 최근 증가하고 있다. 이러한 증가 현상은 온도의 영향을 연구함으로써 점토의 거동을 지배하는 본질적인 메커니즘을 해명할 수 있고 최근 경제활동의 증가와 더불어 화학적인 지반개량, 토양 열 비축시스템 및 방사성 핵폐기물 지하처리 시스템 등 지반이 고온환경에 노출되는 기회가 증가하고 있기 때문이다. 이러한 측면에서 열 이력을 받는 점토 지반의 압밀 및 강도특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 고온조건에 있는 점토의 역학적 거동을 삼축압축 시험을 통해 조사하였다. 구체적인 방법으로는 고온고압형 삼축압축시험기를 이용해서 압밀비배수 삼축압축시험을 20°C, 50°C, 75°C, 80°C 및 100°C 등으로 온도를 변화시켜 실온 및 고온조건에 있는 점토의 변형·전단강도 및 압축·압밀특성 등을 조사하였다.

Keywords : Clay, Shear property, Temperature effect, Triaxial test, Undrained shear strength

1. 서 론

흙의 거동은 응력·변형·시간뿐만 아니라 온도에도 영향을 받는데 이 것을 흙의 온도 감수성이라 한다. 흙 중에서도 점토의 거동이 온도변화에 대단히 민감하여 물로 포화된 점토에 온도 변화가 있다면 입자골격과 흙 속의 물의 열팽창계수 등의 차이에 따라서 간극수압의 변화나 흙 속의 물의 흡수나 배수를 쉽게 관찰 할 수

있다. 이 것은 포화 점토가 단순히 광물입자의 집합체라기보다는 입자는 주변의 물 때문에, 흙 속의 물은 입자의 의존성 때문에 상호 전기 화학적인 힘을 발휘하기 때문이다(Moriwaki 등 1994).

고온환경이 점토의 공학적 특성에 상당한 영향을 미친다고 하는 것은 과거부터 잘 알려진 사실이며 이에 관해서 국내외에서 많은 연구가 진행되어 왔다(Takashi Tsuchida 1991; 이 2004). 이는 최근 경제활동의 증가

에 따라서 지반이 고온환경에 놓이는 기회가 증가하고 있기 때문이다. 그 대표적인 예로서는 화학적 개량을 실시한 지반, 토양 열 비축시스템, 방사성 핵폐기물의 지중 처분등을 들 수 있다. 그 중에서도 방사성 핵폐기물을 안정된 지하 암반에 매설하려고 할 경우 용기와 지중지반 사이에는 점토질과 같은 완충재가 사용될 수 있다. 이 경우 방사성 핵폐기물의 붕괴열에 의해 점토 및 주변지반은 100°C ~ 300°C 정도의 고온환경에 장기간 놓이게 된다. 이와 같은 이유로 고온상태의 점토의 거동뿐만 아니라 100°C를 초과하는 초 고온상태의 점토의 거동을 명확히 규명할 필요가 있다. 또한 점토는 전기 화학적인 힘에 크게 의존(小泉 1995)하기 때문에 점토의 종류 및 시험조건의 차이에 따라서도 다른 현상이 나타나기 때문에 이에 대한 충분한 해명 및 연구가 절실히 요구된다.

한편, 고온변화를 받는 실제 지반의 거동을 밝히기 위해 실시되어 왔던 연구와는 별도로 고온에서 재 압밀된 점토시료의 역학특성이 불교란 자연퇴적점토의 역학특성, 소위 연대효과를 갖는 점토의 역학특성과 유사하다는 연구보고가 있다(Takashi Tsuchida 1991; 이 2000). 실제로 그 시료의 압밀거동은 자연지반에서 나타나는 유사선행압밀효과(quasi-preconsolidation effect)가 나타나고, 전단압축 거동에 있어서도 자연퇴적 점토지반에서 나타나는 변형률 연화 경향을 보이고 있다(Bjerrum 1967).

이와 같이 점토에 미치는 온도효과에 대해서 많은 연구가 진행되고 있는 것은 실제 지반 구조물의 안전성 확보 및 지반환경의 보전이라는 문제의 해결 그리고 연대효과를 갖는 점토를 실내에서 재현 할 수 있다는 점 및 간극비와 유효응력의 개념에 입각하고 있는 토질역학의 이론체계를 재구축할 수 있는 가능성이 기대되기 때문이다.

이상과 같은 관점으로부터 본 연구에서는 고온조건 상태에 있는 점토의 거동에 대해서 역학적인 거동특성을 밝히고자 한다. 구체적인 방법으로는 새롭게 개발한 고온고압형 삼축압축시험기를 사용해서 압밀비배수 삼축압축시험을 실시하여 실온상태의 20°C에서 부터 최대 100°C의 고온조건에 있는 점토의 압밀·압축특성 및 전단·강도특성을 연구하고자 한다.

2. 고온이력을 받는 점토지반의 거동 예

자연계에서 온도이력을 받는 지반의 예를 살펴보면

지반은 지구규모의 기후변동이나 1년 또는 1일을 주기로 하는 열 환경 변화의 영향을 평상시 받고 있다. 또한 온천지대에서는 지반이 열에 의해 변질되고 지반 활동이 일어나는 일도 있다. 그러나 최근의 열 변환기술, 열 비축 기술의 향상에 의해 열 이용의 형태가 다양화 되고 있다. 여기에서는 이와 같은 고온환경에 놓여 있는 지반에 대해서 그 대표적인 예를 소개한다.

2.1 개량지반

생석회 말뚝을 타설한 지반은 생석회의 반응열에 의해 온도가 상승하고 일정기간 후에는 고온상태가 되어 고온 압밀 상태가 된다. 이는 생석회말뚝의 타설로 인한 반응열이 단열계의 흙 속에 장기간 보존되기 때문이며 실제적으로 생석회말뚝을 타설한 현장의 경우 말뚝 중심부 및 말뚝주변지반의 높은 지중온도를 계측한 결과가 있다(木次 1991). 이 보고서에 의하면 생석회(CaO)와 물(H₂O)과의 반응은 물이 액체상태에서는 한계온도가 320°C가 되지만 현지 계측에서는 생석회말뚝 중심부에서 최고 300~400°C까지 온도가 상승하고 2일 후에는 100°C이하로 저하된 후 주변지반의 온도와 균형을 이룬다고 보고하고 있다. 따라서 생석회말뚝 개량지반은 이로 인하여 함수비 저하 및 팽창효과 그리고 실내 고온압밀시험에서 얻어지는 유사압밀 촉진효과가 얻어지게 된다.

2.2 방사성 폐기물 주변지반

핵연료인 우라늄, 플루트늄을 회수하는 과정에서 발생되는 고수준 방사성 폐액은 고화체로 안정처리 한 후 지하 수백 미터보다 더 깊은 지층 속에 매설해야 한다. 고수준 방사성폐기물은 지층처분 후에도 높은 방사능을 방출하고 동시에 장기간 발열하기 때문에 주변지층의 온도가 상승하게 된다. 또한 폐기물수납을 위해 설치한 말뚝, 처분터널, 처분구멍 등의 공간은 고화체를 수납 후 완충재로 충전시키고 폐쇄시키기 때문에 완충재는 저 투수성, 핵 종류 흡수성, 팽윤성, 열전달성이 요구되므로 점토, 모래, 파쇄한 암석, 벤토나이트 등이 대상이 된다. 온도 상승은 폐기물 종류 등의 발열량, 지층내의 폐기물 처리 수량과의 간격, 지층의 열 및 수리특성 등의 조건에 따라서 다르지만 다양한 수치해석(石井 1985) 결과에 의하면 폐기물 주변에서 수십~수백 년간 100°C 전후 혹은 그 이상의 온도가 발생된다고 한다.

2.3 토양 열 비축시스템

도시와 그 주변에는 대량의 열에너지 배출로 인해 온도 상승 문제가 현실화되고 있다. 최근 에너지의 유효이용 방법으로 점토지반에 열을 비축하는 토양 열 비축시스템이 개발되고 있다. 이것은 지반 속에 설치한 파이프에 고온의 액체를 순환시켜 지반을 가열하고 열을 비축하는 것이다. 초기의 토양 열 비축시스템은 40°C 정도의 비교적 낮은 온도조건이었기 때문에 히터 파이프만 필요했지만 최근에는 히터파이프 없이 70°C 이상의 열을 비축하는 경제적인 방법이 개발되고 있다. 이 때문에 점토지반은 고온상태가 되고 지반의 침하와 강도의 저하가 발생하게 된다(阿部 2001).

2.4 쓰레기 매립장 지반

쓰레기 매립장은 종래에 단순한 최종 처분장 이었던 것이 최근에는 토지이용을 겸할 수 있는 대상이 되었기 때문에 사전에 그 특성을 충분히 파악해 놓을 필요가 있다. 쓰레기 매립지반은 매립재료 중 유기물의 마식, 분해에 수반된 발열 등에 의해서 매립 후 일정기간 고온상태가 되므로 고온이력을 받게 된다. 清水(1988)은 동경만 쓰레기 매립장의 지중온도를 장기간 계측한 결과,

쓰레기 지반 자체의 지중온도는 매립 종료시에 60°C 전후로 고온을 유지하고, 그 경향이 5년 이상 계속되고, 10년째 접어들어 저하를 시작하여 20년 정도 경과된 후 거의 분해 말기에 도달하였다고 보고하였다.

3. 시험시료 및 시험장치

3.1 시험시료

(1) 시험 시료의 기본적 성질

시험에 사용된 시료는 벤토나이트, 카올리나이트 및 出島(Dejima)점토를 사용하였다. 벤토나이트 및 Dejima 점토는 방사성폐기물의 지중 처리시 실제 완충재로 이용되는 재료이고, 카올리나이트는 벤토나이트와 광물조성이 대조적이며 화학적으로 안정된 점토이며 시중에서 구득하기 쉽다는 장점 때문에 본 시료를 연구에 적용하였다. 각 시료의 화학조성 및 물리적 특성은 표 1 및 표 2와 같다.

(2) 시료의 배합 및 시험조건

본 시험에 이용되는 시료의 배합과 온도 조건은 표 3과 같다. 여기서 벤토나이트만의 시료를 작성하지 않은 것은 벤토나이트는 액성한계가 대단히 크고 삼축시

표 1. 화학조성(%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Loss
카올리나이트	67.85	27.5	-	-	0.23	3.62
벤토나이트	74.0	11.0	4.0% 이하	3.0% 이하	4.0% 이하	8.0

표 2. 각 시료의 물리적 특성

	액성한계 W _L (%)	소성한계 W _P (%)	소성지수 I _P (%)	비중 G _s
카올리나이트	50.5	34.1	16.4	2.724
벤토나이트	409.2	53.9	355.5	2.576
혼합점토	84.6	27.2	57.4	2.662
Dejima 점토	98.2	40.6	57.6	2.621

표 3. 시료배합 및 시험조건

시험시료	시험조건	중량비 (카올리나이트: 벤토나이트:점토)	시료 제조시 사용 간극수	최종압밀압력 (kPa)	등방압밀압력 (kPa)	등방압밀시 온도(°C)
카올리나이트점토		1:0:0	CaCl ₂ (0.1N)	196	500	20, 50, 75, 100
혼합점토		3:1:0	CaCl ₂ (0.1N)	196	500	20, 50, 75, 100
Dejima 점토		0:0:1	증류수	49	80	20, 50, 80 20(등방압밀) -->80(전단시)

험에 필요한 높이의 시료를 작성하기 어렵기 때문이다. 본 실험에서 시료 작성시 사용된 간극수는 증류수 및 염분농도가 0.1N인 CaCl₂ 용액을 사용했지만 간극수 차이에 따른 연구는 실시하지 않았다.

상기와 같이 3종류의 시료를 선택한 것은 먼저 카올리나이트 점토와 카올리나이트에 벤토나이트를 섞은 혼합점토의 경우 고온 환경에 놓이는 기본적인 점토광물의 압밀·전단특성을 해명하기 위한 것이며 해성 점토인 Dajima 점토는 두 종류의 시험시료와는 별도로 고온 환경에 놓여있는 자연퇴적점토의 압밀·전단특성에 대한 강도변형특성을 규명하기 위한 것이다.

(3) 시료제작

카올리나이트 및 벤토나이트가 소정의 배합이 되도록 혼합한 후 초기 함수비를 카올리나이트 점토는 액성한계의 1.8배, 혼합점토 및 Dejima 점토는 2.0배가 되도록 0.1N의 농도를 갖는 염화칼슘용액 및 증류수를 가지고 시료를 혼합한다. 이 시료가 균일하게 되도록 하기 위해 진공탈기장치 및 믹서로 시료를 6시간 정도 교반하면서 점토속의 공기를 빼낸다. 탈기가 끝나면 압밀장치인 몰드(직경=247mm, 높이=400mm, 두께=10mm)에 시료를 집어넣고 24시간 자중압밀을 실시한다. 그 후 벨로프레임 실린더를 사용해서 각 단계별 압밀시간을 24시간씩 1.96→7.84→29.4→49.0→98.0→196.0kPa의 단계별로 연직압밀 응력을 실온조건에서 재하한다. 최종 압밀압력인 196.0kPa(Dejima 점토의 경우는 49.0kPa)에서는 3t법(Japan Geotechnical Society, 1990)에 의해 1차 압밀 종료시간을 결정하고 압밀을 종료시킨다. 압밀이 종료되면 몰드로부터 시료를 채취하여 4등분하고 그 후 함수비의 변화를 방지하기 위해 시료를 포리에틸렌호

일로 감싼 뒤 파라핀으로 코팅하여 약 20℃의 항온실에 보관한다.

3.2 시험장치 및 시험방법

본 연구에서 사용된 시험장치는 일본 히로시마대학교 지반공학연구실에서 보유하고 있는 고온고압형 삼축시험기이며(木下 2002), 대부분 일반 삼축시험과 동일하며 단지 셀 안에 온도조절 장치가 설치되어 있고 삼축셀이 스테인레스로 되어 있다는 점과 셀 안은 삼축 시험에서 사용했던 증류수가 아닌 실리콘 오일을 사용한 것이 본 실험의 특징 중 하나이다. 100℃를 초과하는 조건으로 시험을 실시할 경우 물의 증발과 물에 포함되어 있는 공기의 팽창이 발생되어 위험하기 때문에 실리콘 오일을 사용했다. 또한 고온조건 온도 조절은 셀압 410kPa, 배압 400kPa에 놓고 소정의 온도까지 라바히터로 삼축셀을 외부로부터 가열하여 셀내의 실리콘 오일의 온도를 상승시킨다. 이 때 셀내의 하부에 있는 온도계를 이용하여 실리콘 오일의 온도를 측정하면서 라바히터의 온도를 자동 조절하게 된다.

시험시료는 직경 50mm, 높이 100mm의 공시체를 사용했으며 공시체 설치상황 및 설치완료시의 전경은 사진 1 및 사진 2와 같다. 시료 설치작업이 완료되면 소정의 압밀압력으로 각 시료의 온도조건에 따라서 등방압밀을 실시한 후, 공시체를 비배수 상태로 압축시험을 실시한다. 축 변형 속도는 0.054%/min이며 축 변위가 16%가 될 때까지 압축을 행한다.

한편 축 압축력은 셀 실 외측에서 축력을 측정할 경우 축봉과 축봉을 받는 사이에 마찰이 발생되기 때문에 과대평가가 될 가능성이 있어 셀 실 내부에서 축압을 측정

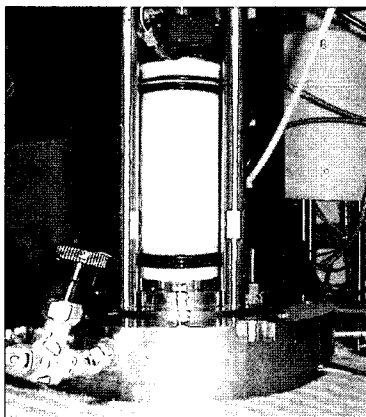


사진 1. 공시체 설치 상황

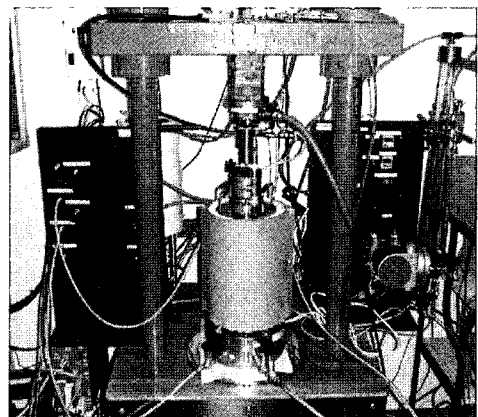


사진 2. 설치완료시의 상황

하는 방법이 유리하다. 그러나 본 실험에서는 고온상태에서 시험을 실시할 경우 온도의 영향을 크게 받고 축압축력을 정확히 측정하기 어려워 셀 실 외측에서 축압축력을 측정했다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 압밀과정시의 간극비 변화 고찰

그림 1~그림 3은 각 시료별 삼축압축시험시의 등방압밀과정에서 얻어진 $e-\log p$ 관계를 표준압밀시험(Dejima 점토는 제외) 결과와 함께 나타내었다. 여기서, 표준압밀시험은 온도조건과 관계없는 실온상태에서의 압밀시험 결과이며 다른 시험결과는 소정의 온도조건(20°C ~ 100°C)에서 등방압밀압력이 10~500kPa일 때의 시험결과이다. 그림에서와 같이 배수조건에서 온도상승을 실시한 결과 그림 1의 카올리나이트점토의 경우 $p=10\text{kPa}$ 시점에서

간극비가 감소하고 압밀이 진행되고 있다는 것을 명확히 알 수 있으며 그 경향은 그림 2와 같은 혼합점토에서도 비슷하게 나타나고 있다. 또한 어느쪽의 시료에서도 온도조건이 높으면 간극비의 변화가 아래 방향으로 이동하는 경향이 현저하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 Dejima점토의 결과를 나타낸 것으로 온도상승시의 간극비 변화량(A부분)은 온도변화가 클수록 크게 나타나고 있다. 이는 온도상승으로 인하여 압밀이 촉진된다고 말할 수 있다. 그러나 온도가 일정한 압밀과정에서는 고온조건 일수록 곡선의 기울기가 완만하게 되고 최종적인 간극비는 고온시료 일수록 크게 나타나고 있다. 또한 그림내의 (2)는 20°C 실온에서 압밀을 행하고 압밀종료시에 80°C 까지 온도를 상승시킨 결과이다. 그림상에서 (2)와 (1)의 경우를 20°C 온도조건에 대하여 그 결과를 비교하면 압밀압력 10kPa시의 간극비의 차는 있지만 $e-\log p$ 의 곡선의 기울기는 거의 동일하며, 그래프 내의 일정 압밀압하에서의 간극비 변화량(A와 B)은 거

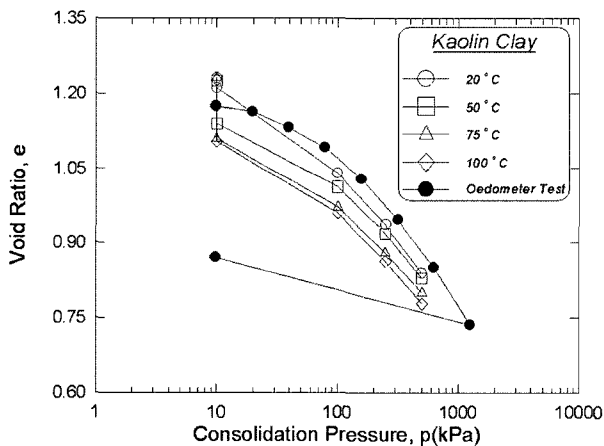


그림 1. $e-\log p$ 곡선 비교(카올리나이트점토)

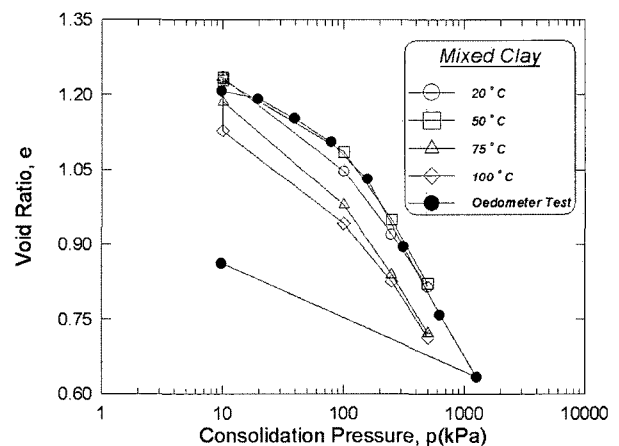


그림 2. $e-\log p$ 곡선 비교(혼합점토)

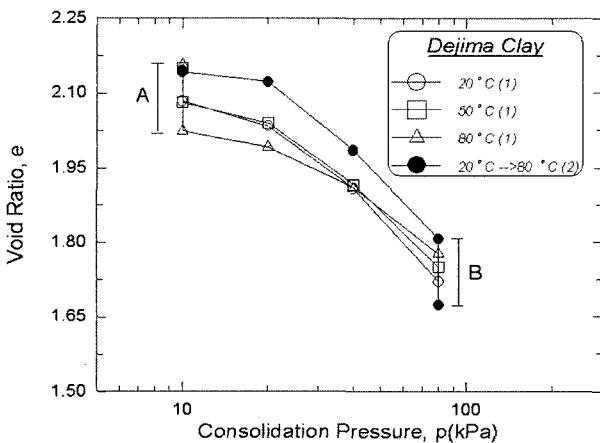


그림 3. $e-\log p$ 곡선 비교(Dejima점토)

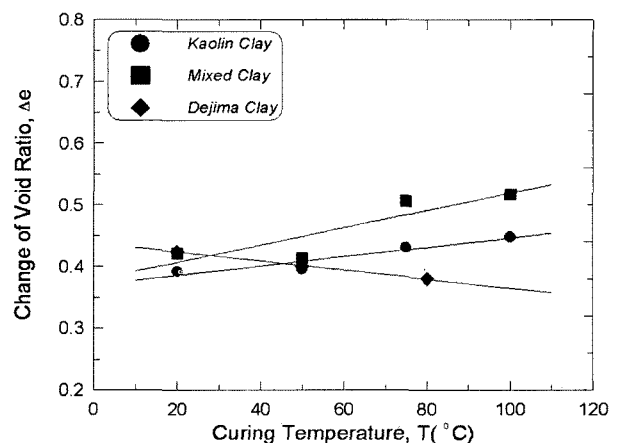


그림 4. 온도-간극비 변화량

의 일치하고 있다고 생각된다. 그러나 최종적인 간극비는 (2)의 경우가 적게 나타나고 있어 온도이력의 차이에 의한 압밀특성의 차이가 변화하고 있음을 알 수 있다.

그림 4는 등방압밀압력 $p=500\text{kPa}$ (Dejima 점토는 80kPa)까지 압밀했을 경우 각 시료의 온도-간극비 변화량관계를 나타낸 것이다. 여기서 간극비 변화량은 압밀후의 간극비와 초기간극비의 차이이며 온도변화와 압밀압력의 증가 및 이 두 가지의 상호관계의 조합으로부터 얻어진 결과이다. 온도 증가와 더불어 간극비의 변화량은 카올리나이트점토, 혼합점토 순으로 증가하고 있는데 이는 고온일수록 점토입자 표면의 흡착수는 자유수로 변화하고 흡착층 두께가 감소하여 1차압밀량이 증가하는 현상(小泉 등 1995)이 사용된 시료들에서도 나타난 것으로 보인다. 그러나 Dejima 점토의 경우는 온도증가와 더불어 간극비 변화량이 감소하고 있어 앞의 결과와 역의 결과가 나타났다. 그 이유는 Dejima 점토는 온도상승시의 1차압밀축진과 동시에 일어나는 골격구조의 발달(Collins K 1974; Pisit 1991)로 인하여 온도 흡착수층의 감소가 발생 하더라도 온도증가에 따른 압밀의 증가현상이 크게 나타나지 않았기 때문으로 생각된다.

4.2 전단과정시의 시험결과 및 고찰

(1) 주응력차-축변형율

그림 5~7은 각 시료별로 등방압밀 후의 비배수 전단시의 주응력차(q)-축변형율(ϵ_a)의 관계를 나타낸 것이다. 전반적으로 카올리나이트점토 및 혼합점토의 경우는 고온시료 쪽이 주응력차가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 고온시료 일수록 등방압밀시의 배수량이 많아 압밀이 촉진되고 토립자 구조가 밀실(小泉 1995)하게 되었기 때문으로 생각된다. Dejima 점토의 경우는 온도 차이에 의한 명확한 강도증가 또는 감소현상 등은 보이지 않았는데 이는 4.1절에서 설명한 바와 같이 전단전의 간극비의 차이 즉, 고온조건에서 압밀된 시료일수록 간극비 변화량은 작고 압밀후의 간극비는 더 크게 나타난 특징이 본 시험결과에 반영된 것으로 판단되며 향후 추가적인 실험을 통한 보완 연구가 필요하다.

한편 시료를 대상으로 비교하면 카올리나이트 점토의 응력-변형곡선은 변형율 경화형, 혼합점토 및 Dejima 점토는 변형율 연화형 곡선을 보인다. 여기서 혼합점토의 경우 축변형율이 8~10% 정도에서 주응력차의 피크가 나타나고 온도가 높을수록 피크를 초과한 후 연화

경향이 증가하고 있다. 이는 고온시료 쪽이 실온시료 보다 골격구조가 더 잘 발달되어 있어 시료가 파괴된 후 연화 경향이 더 크게 나타나고 있기 때문으로 생각된다.

또한 온도만을 대상으로 비교하면 카올린 점토쪽이 혼합점토에 비해서 압밀후의 간극비는 크지만 20, 50,

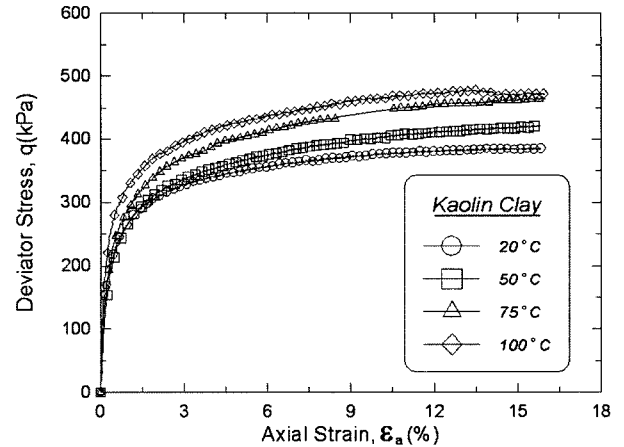


그림 5. 주응력차-축변형율 관계(카올리나이트점토)

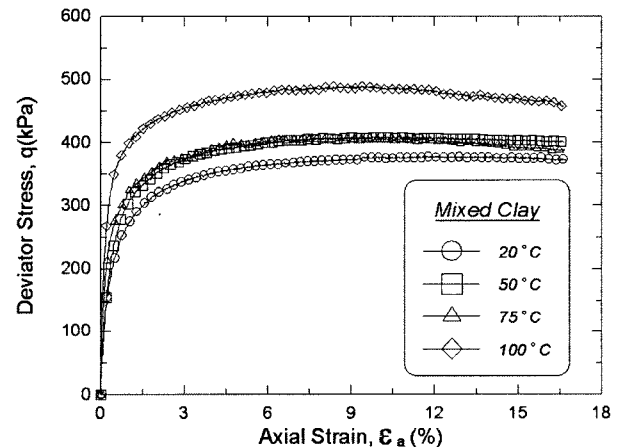


그림 6. 주응력차-축변형율 관계(혼합점토)

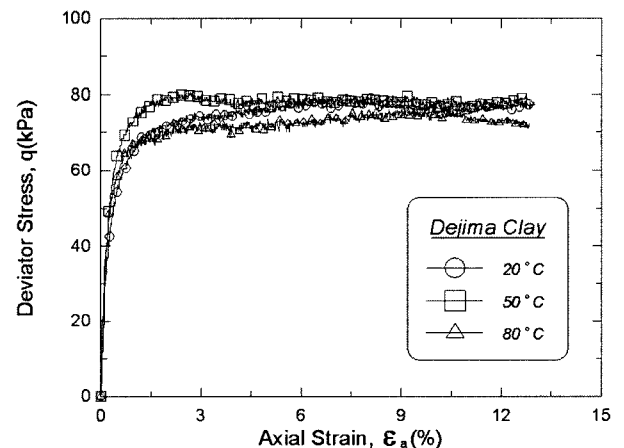


그림 7. 주응력차-축변형율 관계(Dejima점토)

75°C에서는 카올리나이트 점토의 축차응력이 더 크게 나타나고 100°C에서는 혼합점토 쪽에서 축차응력이 더 크게 나타나고 있다. 이는 벤토나이트의 화학적물질의 변화에 의한 것으로 생각되지만 이 점에 대해서는 카올리나이트 점토에 대한 재시험과 배합율을 변화시킨 혼합점토의 실험을 더 행할 필요가 있다.

(2) 유효응력 경로

그림 8 및 그림 9는 카올리나이트 및 혼합점토의 유효응력 경로(p - q)를 나타내고 있다. 그림에서 카올리나이트 점토, 혼합점토 모두 전단초기에 고온조건 일수록 유효응력 경로가 우측(전응력쪽)으로 이동하고 있다. 또한 본 실험에서 카올리나이트 점토 및 혼합점토 어느 쪽 시료도 정규압밀점토의 거동을 보이지만 고온조건 일수록 과압밀 점토의 거동에 가깝게 근접하고 있음을 알 수 있다. 그리고 카올리나이트 점토에서는 일정 피크를 지나서 유효응력이 증가하고 있는 반면 혼합점토에서는 유효응력이 감소하고 있어 주응력차에 대한 결과의 특성을 잘 표현하고 있다고 말할 수 있다. 그림 10은 Dejima 점토 시료의 유효응력경로를 나타낸 것으로서 온도상승으로 인한 영향은 명확하게 알 수는 없었다. 이것은 전단전의 간극비의 차이가 그 원인으로 생각된다.

(3) 온도의 영향에 따른 강도특성 고찰

그림 11은 유효내부마찰각 ϕ' 과 온도의 관계를 분석하여 나타낸 것이다. 카올리나이트 점토의 경우 내부마찰각이 고온조건 일수록 작은 값을 나타내고 있으며 혼합점토의 경우는 고온조건일수록 증가하는 경향을 보였다. 혼합점토의 이러한 경향은 고온조건일수록 고위의 구조를 나타낸다는 결과로부터 본 실험 결과는 면모화의 구조가 발달했을 가능성이 있으며 전단후도 그의 구조가 남아 있을 가능성 때문에 내부마찰각 값이 크게 나타나지 않았나 생각된다. 그러나 시험결과의 이산이 있어 금후 추가적인 실험을 통해 검토할 필요가 있다. Dejima 점토의 경우는 온도변화에 따른 명확한 경향을 보이지 않았지만 50°C 일때의 내부마찰각 값을 제외한다면 고온일수록 마찰각이 증가한다.

그림 12는 각 시료별로 최대축차응력과 온도의 관계를 나타낸 것이다. 카올리나이트 점토 및 혼합점토의 경우 온도의 증가와 더불어 최대축차응력은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 온도의 상승과 함께 점토의 압밀이 촉진되고 간극비가 감소하는 것으로 생각된다.

반면에 Dejima 점토의 경우는 온도의 증가와 더불어 강도의 증가현상은 잘 나타나지 않았다.

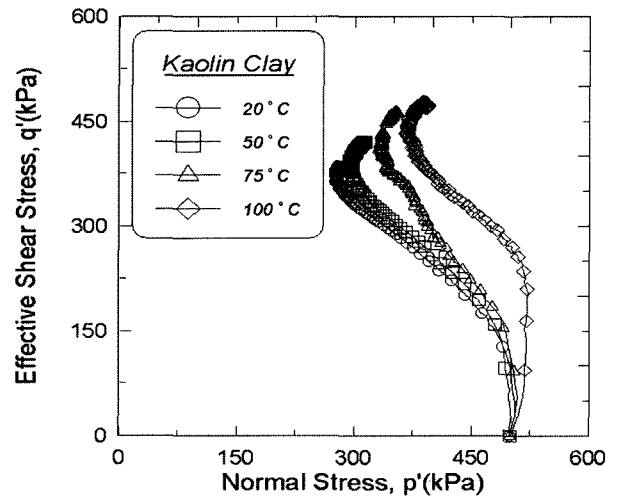


그림 8. 유효응력경로도(카올리나이트점토)

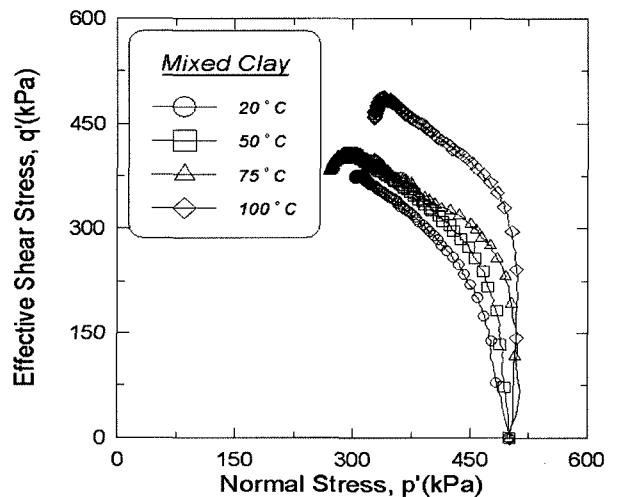


그림 9. 유효응력경로도(혼합점토)

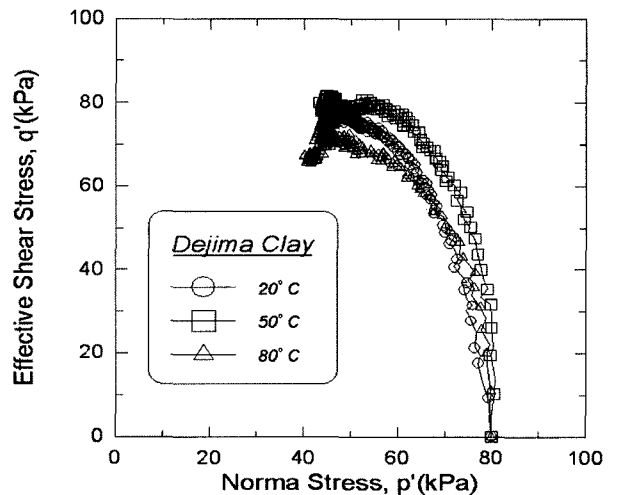


그림 10. 유효응력경로도(Dejima점토)

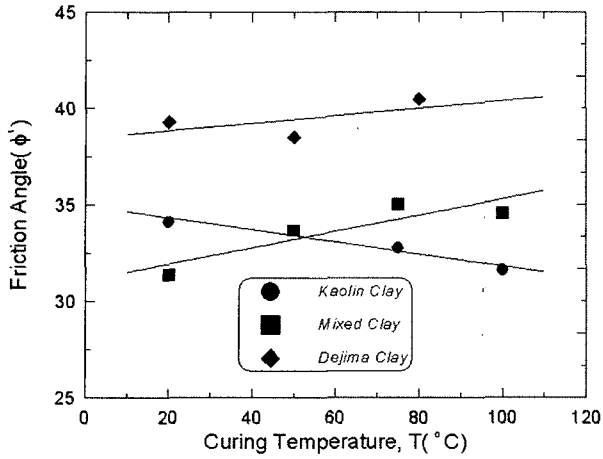


그림 11. 온도-내부마찰각(ϕ')의 관계

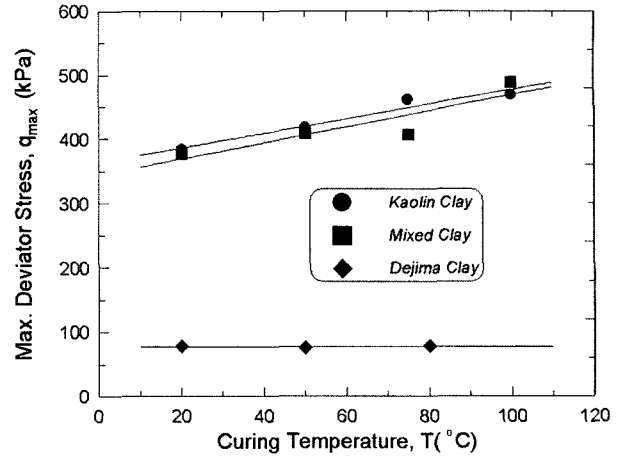


그림 12. 온도-최대주응력차 관계

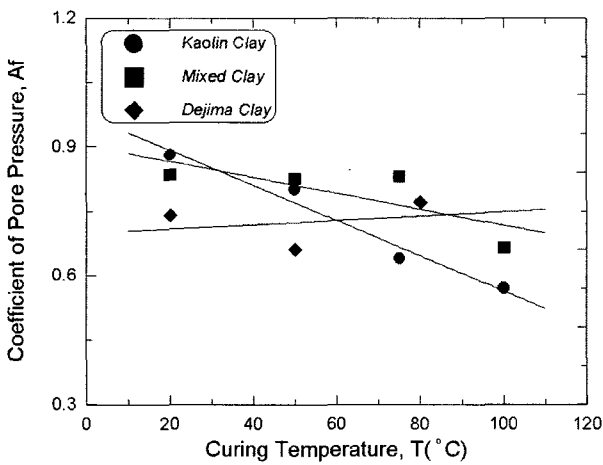


그림 13. 온도-간극수압계수관계

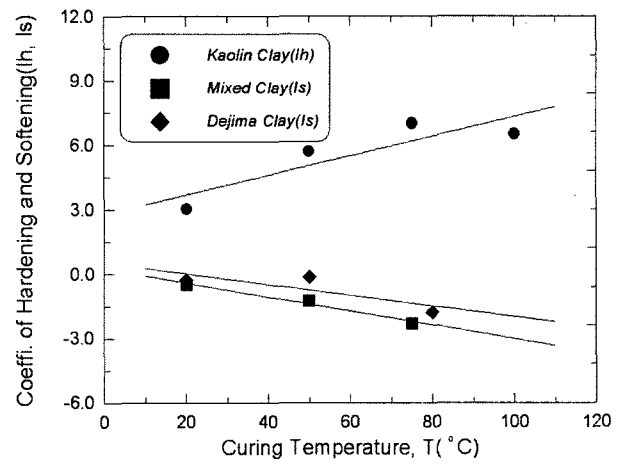


그림 14. 온도-경화 및 연화계수관계

그림 13은 온도변화에 따른 간극수압계수의 변화관계를 나타내었다. 카올리나이트점토의 경우는 고온조건일수록 간극수압계수의 감소가 현저하지만 혼합점토 및 Dejima 점토의 경우는 데이터의 이산의 영향을 감안할 때 간극수압계수의 증감의 경향은 잘 나타나지 않았다.

(4) 경화 및 연화계수 고찰

전항까지의 결과로부터 전단초기에는 변형강도특성에 온도 의존성이 있음을 실험 결과로부터 알 수 있었다. 본 항에서는 각 시료의 전단후기의 시험 결과에 착안하여 고찰을 실시하였다. 이를 위해 변형을 경화형 및 변형을 연화형 전단특성을 나타내는 시험 결과를 아래 수식 (1), (2)와 같이 경화계수(I_h) 및 연화계수(I_s)로 구분하여 각각의 계수를 산정하여 분석하였다(Dejima 점토의 경우 축변형율은 13%적용).

$$I_h = \frac{q_a - q_b}{(\Delta \epsilon)} \quad (1)$$

$$I_s = \frac{q_a - q_c}{(\Delta \epsilon)} \quad (2)$$

여기서, I_h , I_s : 변형을 경화계수, 변형을 연화계수
 q_a : 축변형율 15%일때의 주응력차(kPa)
 q_b : 유효응력이 최소가 되는 점의 주응력차(kPa)
 q_c : 최대주응력차(kPa)
 $\Delta \epsilon$: 파괴시로부터 축변형율 15%에 도달할 때 까지의 축변형율 증가량(%)

그림 14는 계산된 각 시료별 계수와 온도의 관계를 나타낸 것이다. 카올리나이트 시료는 유효응력이 최소가 되는 점 이후 변형을 경화가 일어나 점토의 골격구조가 저위의 구조로 이동하고 있으며 이 경향은 고온조건일수록 현저하게 나타나고 있다. 이것은 고온에 의해 감

소된 강도의 회복이 그 기간에 발생했다고 판단할 수 있다. 이에 반해서 혼합시료 및 Dejima점토의 경우는 카올리나이트 시료와는 다른 변형을 연화형 전단특성을 나타내고 있으며 그림에서와 같이 온도가 높을수록 변형을 연화 경향이 탁월하게 나타나고 있다. 이는 고온상태의 시료 일수록 골격구조가 세멘테이션 등에 의해 고위의 구조로 이동하고 있음을 나타낸다.

5. 결론

본 연구는 온도이력을 받는 점토의 공학적 성질에 대해서 고온고압형 삼축압축시험기를 이용해서 \overline{CU} 시험을 행하고 온도이력을 받았던 점토의 변형·강도특성 및 압축·압밀특성에 대하여 조사하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 등방압밀과정시 온도와 간극비의 관계에서는 카올리나이트 및 혼합시료 모두 온도이력을 받을수록 등방압밀시의 배수량이 증가하고 간극비의 감소량이 크게 나타났다. 이는 고온상태일수록 압밀이 촉진되고 토립자 구조가 밀실하기 때문으로 생각된다.
- (2) 등방압밀후의 비배수 전단시의 주응력차와 축변형을 관계에서는 카올리나이트 및 혼합시료 모두 고온일수록 주응력차가 더 크게 나타났지만 Dejima점토의 경우는 온도차에 의한 강도의 차이는 잘 나타나지 않았다. 이는 전단전 간극비의 차이가 그 원인으로 생각된다.
- (3) 유효응력 경로에 있어서는 카올리나이트 및 혼합시료 모두 온도가 상승하면 전응력 경로측으로 곡선이 이동하여 과압밀 점토의 응력경로와 유사하게 나타났다. 이는 의사과압밀상태에 근접된 특징이 고온이력의 영향으로 인해 나타나고 있다고 생각된다.
- (4) 전단후기의 특징에 착안하여 분석한 경화 및 연화계수는 혼합점토 및 Dejima점토의 경우는 변형을 연화형 전단특성을 나타내어 점토의 골격구조가 고위의 구조로 이동하고 있는 반면 카올리나이트점토의 경우는 변형을 경화형 전단특성을 나타내어 점토의 골격구조가 저위의 구조로 이동하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 간극수의 차이에 의한 전단 및 압밀특성과 해성점토인 Dejima 시료의 경우 온도변화에 따라

전단특성이 명확하게 밝혀지지 못한 점은 추가적인 연구를 통해 보완할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 2004학년도 대전대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고 문헌

1. 이강일 (2000), “불교란 및 재성형 해성점토의 연대효과 재현”, 대한토목학회논문집, 제20권, 제2-C호, pp.119-128.
2. 이강일 (2004), “고온재압밀 점토의 역학적 거동특성에 관한연구”, 한국지반공학학회논문집, 제19권, 제2호, pp.7-14.
3. 木下洋樹 (2002), “高温条件下での粘土の微視的構造と力學特性”, 廣島大學工學部第四類卒業論文.
4. 木次恭一, 下田正雄, 鈴木孝一, 竹田敏彦, 足立格一郎, 中島武道 (1991), “生石灰杭の発熱による改良地盤の温度上昇について”, 第26回土質工學部研究発表會, pp.2075-2076.
5. 小泉和広, 岸本弘樹, 坂上麻子, 土田孝 (1995), “高温で再圧密された粘土の力學特性と理化學特性について”, 第50回土木學會年次學術講演會概要集, pp.276-277.
6. 石井卓, 植田吉造, 今津雅紀, 新谷貞夫 (1985), “高レベル放射性廃棄物地層処分施設の概要とその熱的問題の検討”, 土木学会論文集, No.355 / VI-2, pp.124-133.
7. 阿部信晴, 八杉信, 上本勝広 (2001), “繰返し加熱を受ける粘土地盤の熱連成圧密解析”, 土木学会第56回年次學術講演會, pp.324-325.
8. 清水恵助, 蝦名晋吉, 齊藤征剛, 山本憲史 (1988), “東京湾におけるごみ埋立地盤の土質工學的 研究 (その7)”, 第23回土質工學部研究発表會, pp.13-16.
9. Bjerrum, L. (1967), “Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clay as related to settlements of buildings”, *Geotechnique*, Vol.17, pp.83-118.
10. Collins, K., and McGown, A. (1974), “The form and foundation of micro fabric features in a variety of natural soils”, *Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.223-254.
11. Japan Geotechnical Society (1990), “Method and explanation of soil tests”, Japan, pp.357.
12. Moriwaki, T., Yashima, K. and Nageo, M. (1994), “Shear deformation characteristics of Hiroshima clay cured at high temperature”, *Proc. of the international symposium on pre-failure deformation characteristics of geomaterials*, Vol.1, pp.119-124.
13. Pisit Kuntiwattanakul (1991), “Effect of high temperature on mechanical behavior of clays”, *Doctor thesis of Tokyo university*.
14. Takashi Tsuchida, Masaki Kobayashi and Jun Ichi Mizukami (1991), “Effect of aging of marine clay its duplication by high temperature consolidation”, *soils and foundations*, Vol.31, No.4, pp.133-147.

(접수일자 2004. 12. 30, 심사완료일 2005. 6. 3)