

고준위폐기물 차폐용 압축벤토나이트의 응력-변형을 거동 분석

A Study on Stress-Strain Characteristics of Compacted Bentonite for High-Level Radioactive Waste Repository

김도현¹⁾, Dohyun Kim, 정상섭²⁾, Sangseom Jeong,

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : The stress-strain characteristics of compacted bentonite are investigated using experimental triaxial compression test by Hoek-cell. Special attention given to various dry density and water absorption ratio. Based on the test results, it is shown that the stress-strain relationship of compacted bentonite is highly influenced by dry density and water absorption ratio. Also, characteristics of Bentonite is similar to the clay rather than sand. Strength of compressed Bentonite increases with higher dry density. It shows maximum strength value, if in a same condition with dry density and constrain pressure. So we determine that value as the optimistic moisture contents for the maximum strength of compressed Bentonite.

Keywords : compacted Bentonite, dry density, undrained triaxial compression tests, Hoek-cell, the optimum water absorption ratio

1. 서론

벤토나이트의 화학적 성분은 다른 점토와 같으며 천연 점토 광물로서 물속에서 그 중량의 수배의 물을 흡수하는 분자구조를 가지고 있다. 이러한 벤토나이트의 큰 팽창성과 물에 대한 흡수성은 흙사이의 간극을 채워 물의 침투를 차단하고 습윤상태를 유지한다. 이러한 특성을 가진 벤토나이트는 토목공사현장에서 고팽창 첨가제로서 또는 콜로이드 슬러리를 만들기 위하여, 물과 혼합한 형태의 두 가지 목적으로 많이 이용되고 있다. 그리고 벤토나이트의 친수성과 팽창력은 흙 속에서 물의 흐름을 차단하고, 유연성이 좋아 지반의 거동에 저항하며, 흙과 혼합하여 슬러리로 지하 침투수를 차단할 수 있는 성능이 있기 때문에 폐기물 매립지의 바닥과 측면 차폐재, 담수호의 바닥재, 슬러리 트렌치 및 산업 폐기물, 중·고준위 핵폐기물의 저장시설 등 각종 토목 구조물 공사에 많이 사용되고 있다. 이와 같이 최근 들어 토목공사현장에서 벤토나이트의 활용은 매우 다양화되고 있다. 토목공사현장에서 벤토나이트의 활용도가 커짐에 따라 그 수요량 또한 증가하게 되었는데, 사용되는 대부분의 벤토나이트가 수입에 의존하고 있는 실정이다. 국내에 벤토나이트는 경상북도 포항-감포-경주 일대의 제 3기층에 분포하고 있으며 국내 부존자원으로서의 잠재성을 가지고 있다. 벤토나이트의 외국 수입의존도를 줄이고 국내의 지반조건에 맞는 국내산벤토나이트 개발을 위하여 산업체에서 사용가능한 기초 물성치에 대한 많은 연구가 진행되어왔다. 고준위폐기물 처분장에서 고준위 폐기물의 차폐용과 공학적방벽으로서 벤토나이트를 사용하고 있다. 각 나라마다 지반 조건이 다르며 그 특성이 다르기 때문에 우리나라 환경에 맞는 국내산 벤토나이트 물성치를 산정하여야 한다. 고준위폐기물 처분장의 완충재로써의 벤토나이트는 큰 밀도를 요구하며 수분 함량에 따른 물성적 특징이 연구 되어야한다. 하지만, 요구되는 큰 밀도 때문에 벤토나이트에 대한 시료 성형이 어려워, 국내산벤토나이트의 광물학적 특성, 열적 특성 및 화학적 특성에 비해 기본적인 물성치임에도 불구하고 연구가 미비한 실정이다.

본 연구에서는 재료적인 측면에서 순수벤토나이트의 건조밀도와 수분함량을 변화시켜 제조한 9종류의

압축벤토나이트에 대한 실험을 실시하였다. 실험을 통하여 여러 가지 역학적 특성을 측정, 분석하여 이를 고준위폐기물 처분장의 설계 및 시공에 필요한 물성치를 제시하고 나아가 국내산벤토나이트 연구의 기초적인 연구자료 제시에 목적을 두어 연구를 수행하였다.

2. 실험 시료 및 방법

순수 압축벤토나이트의 각 건조밀도와 함수율을 유지한 채 응력-변형률 거동을 파악하기 위하여 혹셀을 이용한 비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 시료는 건조밀도를 1.5g/cm³, 1.6g/cm³, 1.7g/cm³로 변화시키고 각각의 건조밀도에 함수율을 10%, 15%, 20%로 변화 시켜 총 9종류의 시료를 제작하여 일축압축시험(그림 1), 삼축압축시험을 실시하였다.

시료제작에 있어 가장 중요한 것은 건조밀도와 함수율의 영향을 확인 할 수 있도록 균질한 시료를 제작하는 데에 있다. 이를 위하여 같은 부피와 질량으로 나누어 손다짐을 실시하고 양방향으로 압축을 가하여 건조밀도와 함수율의 영향을 확인할 수 있는 균질한 시료를 제작하였다.

2.1 시료

2.1.1 벤토나이트

본 실험에서는 국내산 벤토나이트를 사용하였으며, 순수 벤토나이트 시료를 105℃건조기에서 24시간 이상 건조를 시킨 후 원하는 건조밀도와 함수율에 맞게 성형을 하여 사용하였다. 벤토나이트의 재료적 접근을 위하여 함수율이라는 개념을 사용하였다. 주로 토목분야에서 사용하는 함수비(ω)와 함수율(X)의 관계식은 식(3)과 같으며, 벤토나이트의 무게(W_s)와 물의 무게(W_w)를 시료제작 시 조절하여 함수율 10%, 15%, 20%의 시료를 제작하였다.

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \quad (1)$$

$$X = \frac{W_w}{W_s + W_w} \times 100 \quad (2)$$

$$\omega = \frac{X}{100 - X} \quad (3)$$

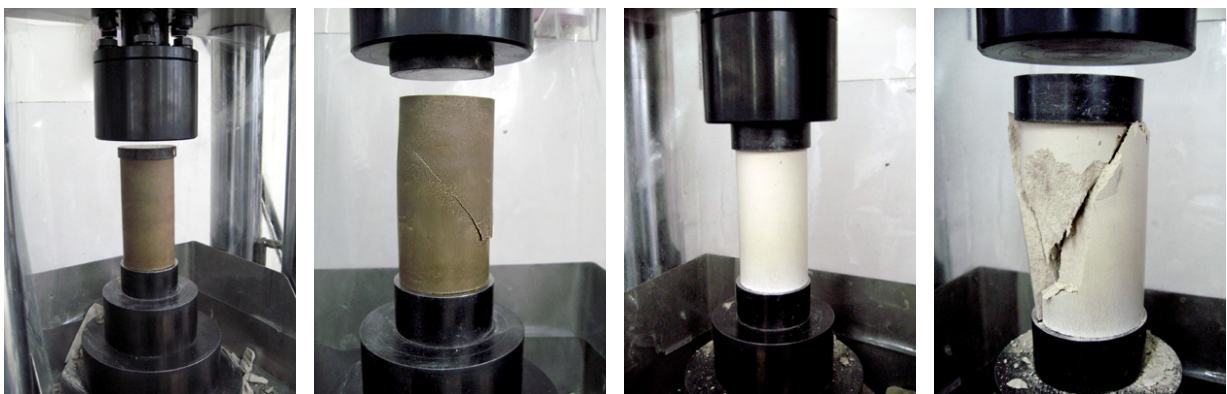


그림 1. 압축벤토나이트의 일축압축시험

2.1.2 시료제작

시료는 NX-core 크기로 직경 54mm, 높이 108mm의 원기둥 모양으로 제작하였다. 105℃ 건조기에서 24시간 건조된 벤토나이트 시료를 건조밀도와 함수율을 맞추어 강재의 몰드에 넣고 로드셀 용량 200ton

의 만능시험기를 사용하여 압축하여 제작하였다.(그림 2) 시료제작 시 부피와 벤토나이트 소요량을 계산하여 5층으로 나누어 다짐봉을 이용한 손다짐을 실시한 후, 만능시험기로 양방향 압축을 가하여 높이에 따른 시료의 균질함이 같을 수 있도록 유지하였다.

벤토나이트와 물의 혼합에는 점토용 믹서를 사용하였으며, 건조밀도(γ_d) 1.5g/cm³, 1.6g/cm³, 1.7g/cm³와 함수율(x) 10%, 15%, 20%에 따른 시료제작을 위해 벤토나이트와 물의 소요량($W_s+W_w=W_t$)을 산정하기 위한 식은 아래의 식(4)을 사용하였다. 식(4)는 벤토나이트와 물을 혼합한 소요량으로 시료전체 질량에 해당한다. 표 1은 건조밀도와 함수율에 따른 함수비, 간극비, 포화도를 비교하여 나타낸 표이다.

$$W_t = \frac{\gamma_d \times V}{100 - x} \times 100 \quad (4)$$



a) 압축벤토나이트제작용 몰드



b) 시료 탈형용 몰드



c) 200ton 급 만능시험기

그림 2. 압축벤토나이트 시료 제작용 몰드 및 만능시험기

표 1. 건조밀도-함수율의 함수비, 간극비 및 포화도의 관계 (벤토나이트의 비중 $G_s = 2.68$)

건조밀도 (g/cm ³)	함수율, x (%)	함수비, ω	간극비, e	포화도, S_r (%)
1.5	10	0.11	0.79	38
	15	0.18		60
	20	0.25		85
1.6	10	0.11	0.68	44
	15	0.18		70
	20	0.25		99
1.7	10	0.11	0.58	52
	15	0.18		82
	20	0.25		100



a) 삼축압축용 흑셀



b) 수동유압공급장치

그림 3. 삼축압축실험장치

2.2 실험 방법

순수 압축벤토나이트 각 시료마다의 함수율을 유지시킨 체 응력-변형률 거동을 파악하기 위하여 암석용 혹셀을 이용하였다. 암석용 혹셀(그림 3(a))은 내부 고무 멤브레인을 통해 유압으로 구속압을 제어할 수 있어 수침으로 인한 시료 내부 구조와 함수율 변화 없이 비배수 삼축압축시험이 가능하다. 삼축압축시험기의 로드셀 용량은 4ton이며 시료는 건조밀도를 1.5g/cm^3 , 1.6g/cm^3 , 1.7g/cm^3 로 변화시키고 각각의 건조밀도에 함수율을 10%, 15%, 20%로 변화 시켜 총 9종류의 시료를 제작하여 일축압축시험 9회, 삼축압축시험을 27회 실시하였다. 삼축압축시험 시 구속압은 예비 실험을 통해 적정 구속압을 결정하여 점착력(c)값과 마찰각(ϕ)값을 구하기 위하여 1.5 kgf, 3.0 kgf, 4.5 kgf로 나누어 실시하였다.

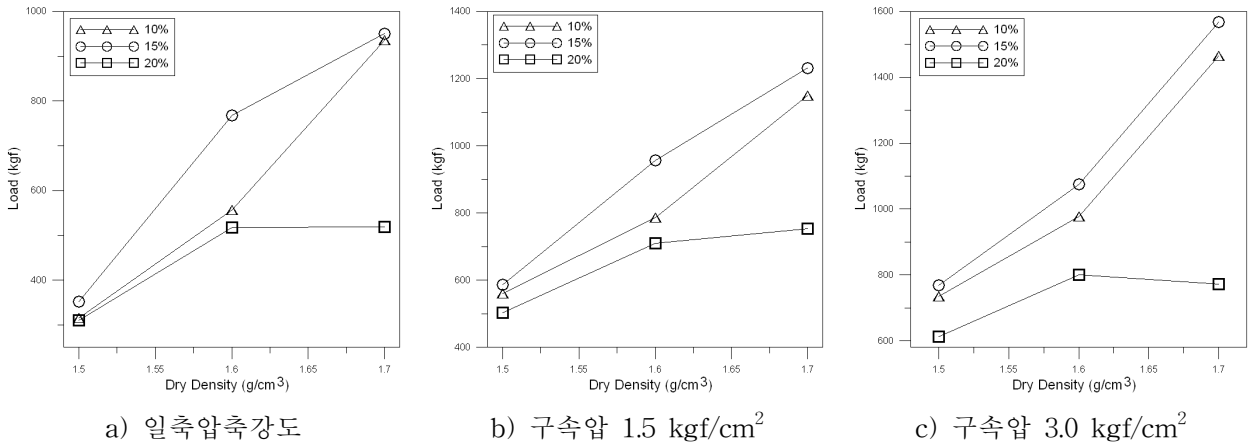


그림 4. 건조밀도와 함수율에 따른 최대하중

3. 실험 결과 및 분석

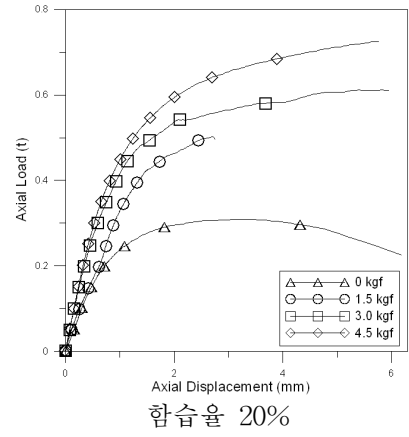
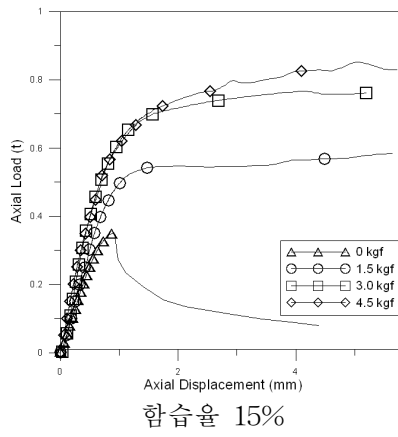
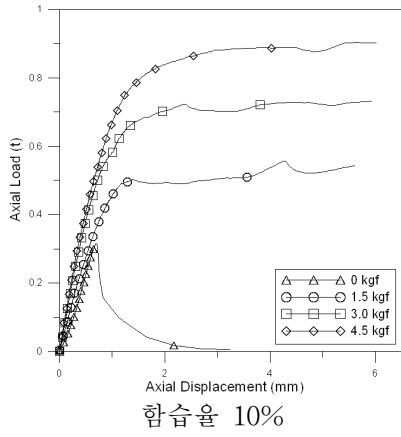
비배수 삼축압축시험을 수행한 결과를 토대로 순수벤토나이트 압축시료의 건조밀도와 함수율에 따른 최대하중의 변화를 나타낸 경로는 그림 4과 같다. 건조밀도가 클수록 강도가 강해지는 것을 알 수 있었으며, 함수율이 15%일 때 가장 큰 강도를 가짐을 알 수 있었다. 건조밀도 1.5g/cm^3 , 1.6g/cm^3 , 1.7g/cm^3 에 대한 함수율 10%, 15%, 20%의 하중-변위 곡선은 그림 5와 같다.

비배수 삼축압축시험 결과를 통해 Mohr Circle과 수정과괴포락선을 이용하여 점착력(c)과 마찰각(ϕ)를 산정하였다. 표 2는 각 건조밀도와 함수율에 따른 점착력과 마찰각의 영향을 나타내었다. 압축벤토나이트의 건조밀도가 커질수록 점착력은 크게 나타남을 알 수 있었고 반대로 마찰각은 작아졌다.

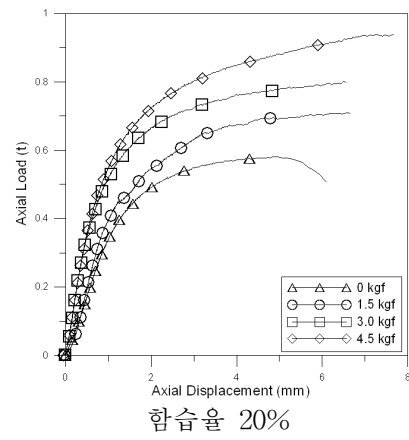
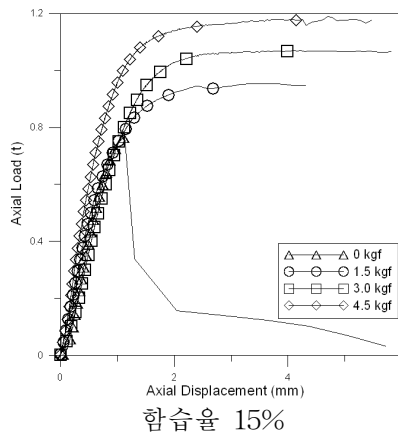
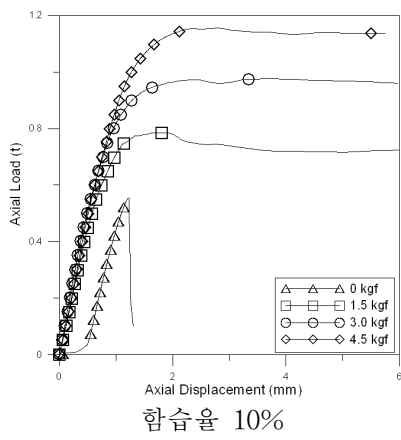
함수율에 따른 점착력과 마찰각을 그래프 그림 6으로 나타내었다. 점착력은 각 건조밀도마다 함수율이 15%일 때 가장 크게 나타났고 마찰각은 함수율이 클수록 작게 나타남을 알 수 있었다.

표 2. 건조밀도와 함수율에 따른 점착력(c)와 마찰각(ϕ)

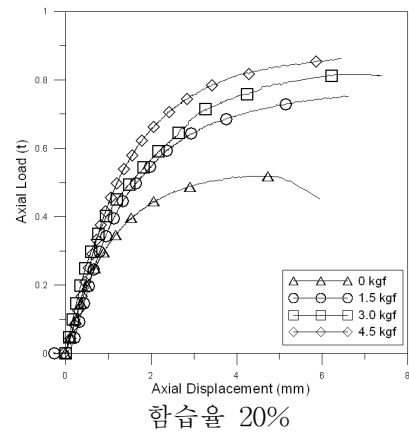
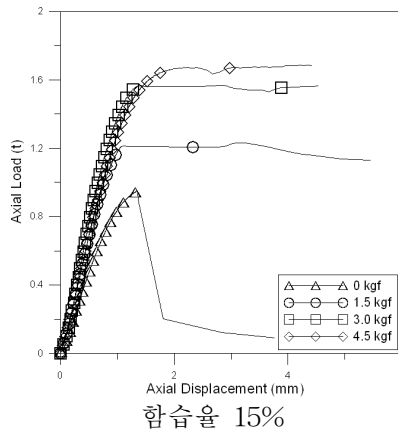
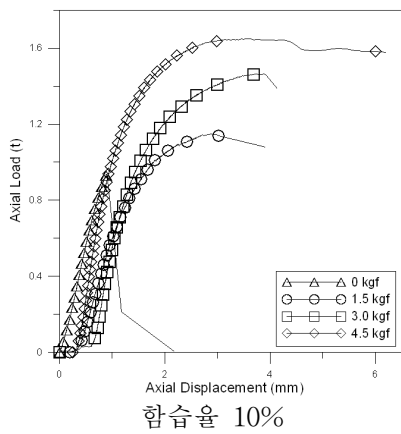
건조밀도 (g/cm^3)	함수율, x (%)	점착력, c (Mpa)	마찰각, ϕ
1.5	10	0.3	44°
	15	0.36	42°
	20	0.35	37°
1.6	10	0.53	43°
	15	0.73	40°
	20	0.67	33°
1.7	10	0.85	42°
	15	1.08	35°
	20	0.77	23°



a) 건조밀도 1.5 g/cm³

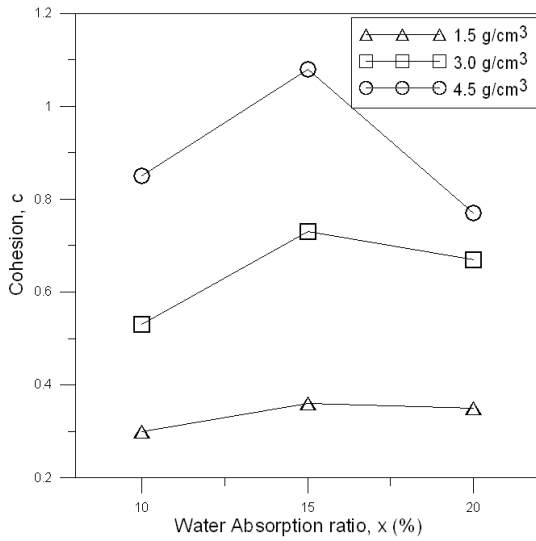


b) 건조밀도 1.6 g/cm³

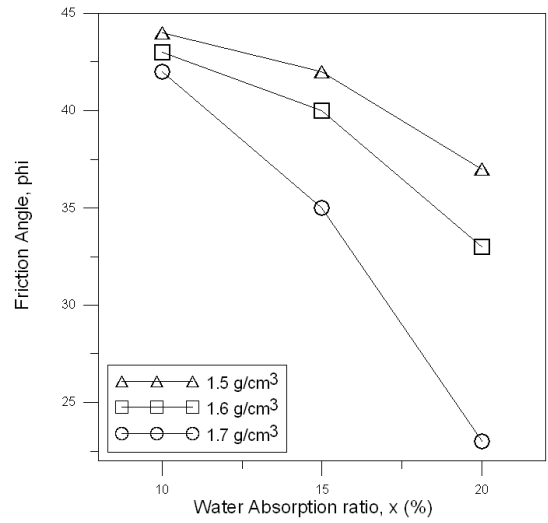


c) 건조밀도 1.7 g/cm³

그림 5. 건조밀도와 함습율에 따른 하중-변위 곡선



a) 각 건조밀도별 함수율에 따른 점착력



b) 각 건조밀도별 함수율에 따른 마찰각

그림 6. 건조밀도와 함수율에 따른 점착력과 마찰계수 관계

4. 결론

본 연구에서는 국내산벤토나이트의 건조밀도와 함수율에 따른 응력-변형률 거동에 대하여 알아보았다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 같은 조건하에서 국내산 압축벤토나이트의 건조밀도의 크기가 클수록 최대지지하중이 커지며 점착력 (c) 또한, 커짐을 알 수 있었다.
2. 반대로, 건조밀도의 크기가 클수록 마찰각(ϕ)는 작아짐을 알 수 있었다.
3. 벤토나이트의 역학적 거동은 점토와 유사하며, 마찰각 보다는 점착력의 영향을 더 크게 받는다.
4. 국내산 벤토나이트의 함수율이 15%일때가 가장 큰 강도를 나타내었고 함수율이 커질수록 마찰각(ϕ)이 작아짐을 보인다.
5. 고분위폐기물 처분장의 완충재로써의 벤토나이트는 건조밀도 1.6 g/cm³를 사용하고 있으며, 설계에 있어서 15%의 함수율이 가장 큰 하중을 받을 수 있다.
6. 본 연구의 건조밀도와 함수율에 따른 국내산 벤토나이트의 역학적 특성을 통하여 고분위폐기물 처분장의 공학적방벽 중의 하나인 완충재로써의 벤토나이트 연구 및 설계에 기본적인 물성을 제공하였다.

참고문헌

1. 고상모, 손병국, 송민섭, 박성완, 이석훈(2002), “벤토나이트의 물리-화학적 성질을 지배하는 요인분석”, **한국광물학회지**, 제 15권, 제 4호, pp.259-272
2. 박성완, 서진영, 이상현(2006), “토목 산업에서의 벤토나이트의 특성과 활용”, **한국광물학회지(광물과 산업)**, 제 19권, 제 1호, pp.64-75
3. 최희주, 이종열, 김승수(2006), 고분위폐기물 처분기술개발, 한국원자력연구원, KAERI/RR-2765/2006
4. M.Victoria Villar, Antonio Lloret(2008), "Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite", *Applied Clay Science*, vol.39, pp.38 - 49