

Soil-Bentonite 혼합토의 강도 및 투수 특성

Strength and Permeability Characteristics of Soil-Bentonite Mixture

김 광 일¹⁾ · 임 은 상²⁾ · 김 기 영[†] · 신 동 훈³⁾

Jin, Guangri · Im, Eunsang · Kim, Kiyong · Sin, Donghooon

ABSTRACT : Soil mixture using bentonite as a cutoff material is used a lot for various structures such as landfills, banks and dams as cutoff materials. But seepage water is expected to seep since shear failure of filter layer occurs due to external load, embankment load when constructed. Generally, only coefficient of permeability of Soil Mixture is considered irrespective of the changes of intensity on amount of additives. This research is to study on how the changes of amount of bentonite affects permeability and strength of soil mixture. So successive experiments for measuring permeability and strength were conducted as the amount of bentonite changes from 0 to 4%, mixing with the bed material and then making specimens. Around construction site of B dam. As a result, $2.085E-07$ cm/sec was shown when the amount of Soil Mixture was 4%. It is proved that unconfined compressive strength and tensile strength increase as the amount of bentonite increases, but saturation shear strength of bentonite soil mixture from the CD experiment is hardly influenced by the amount of bentonite.

Keywords : Soil-Bentonite Mixture, Unconfined compressive strength, Tensile strength, Shear strength, Coefficient of permeability

요 지 : 차수재로서 벤토나이트를 혼화재로 사용한 혼합토가 매립장, 제방, 댐 등의 다양한 구조물의 차수재로서 많이 이용되고 있다. 그러나 시공 시 외부하중, 성토하중 등에 의한 차수층의 전단파괴가 발생하여 침투수의 침투 등이 예상 되지만 일반적으로 혼합토의 투수계수만 고려할 뿐 혼화제양에 따른 강도변화는 고려하지 않고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 벤토나이트 함량의 변화가 혼합토의 투수 및 강도에 미치는 영향에 대하여 고찰하고자 B댐 축조현장 부근 하상시료에 벤토나이트를 0~4%로 변화하면서 일련의 투수시험 및 강도시험을 실시하였다. 시험결과 투수계수는 벤토나이트 함량 4%에서 $2.085E-07$ cm/sec의 값을 가지는 것으로 나타났다. 일축압축강도 및 인장강도는 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으나, 삼축압축(CD)시험에 의한 벤토나이트 혼합토의 전단강도는 벤토나이트 함량 변화의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

주요어 : 벤토나이트 혼합토, 일축압축강도, 인장강도, 전단강도, 투수계수

1. 서 론

최근 토목 구조물 차수기능 수요의 다양화에 의하여 댐, 하천제방, 저수지, 산업폐기물 매립장, 방사능폐기물처리시설 등에서는 주변환경으로 미치는 영향을 저감하는 동시에 장기적인 안정성을 유지할 수 있는 차수재의 적용이 필수적인 조건으로 대두되고 있다.

차수층으로 사용되는 불투수성 재료의 판단기준은 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec 이하를 의미하며, 일반적으로 입도에 따른 분류시 실트질 이하 부분이 10~15%, 혹은 점토를 5% 정도 함유한 토사가 소정의 차수성을 확보할 수 있는 것으로 보고되고 있다(日本土質工学会, 1983). 하지만 이와 같이 현장 여건상 양질의 저투수성을 가지는 자연상태의 점성토를 대량으로 확보하는 것은 어려우며 또한 경제적으로도 비용이 많이 든다. 그러므로 차수 기준을 만족하는 저투수성

재료를 확보하기 위하여 토목 구조물 시공 현장부근 자연상태의 흙 시료에 수밀성이 우수한 혼화재를 혼합하여 사용하는 방법이 많이 이용되고 있다.

일반적으로 저투수성의 재료로서 벤토나이트를 혼화재로 사용한 혼합토가 매립장, 제방, 댐 등의 다양한 구조물의 차수재로서 많이 이용되고 있으며 투수특성, 팽윤특성 등의 연구가 많이 이루어지고 있는 실정이다. 그러나 시공 시 외부하중, 성토하중 등에 의한 차수층의 전단파괴가 발생하여 침투수의 침투 등이 예상 되지만 일반적으로 혼합토의 투수계수만 고려할 뿐 혼화제양에 따른 강도변화는 고려하지 않고 있는 실정이다(김대만 등, 2006). 댐, 제방, 매립장 등 물-지하수와 직접적으로 접촉하고 있는 지반구조물에서 구조물의 안전성을 확보함에 있어서 투수-강도 특성 모두 중요한 항목임을 알 수 있다.

1970년대에 이르러 지반공학 분야에서 매립장 등 차수재

1) 비회원, K-water 연구원 위촉연구원

2) 정회원, K-water 연구원 선임연구원

† 정회원, K-water 연구원 책임연구원(E-mail : kky0606@hanmir.com)

3) 정회원, K-water 연구원 수석연구원

의 개발에 관심을 가지기 시작하여 Auvinet(1980) 등은 점토 차수재에 관한 연구를 수행하였고, Lundgren(1981)과 Chapuis(1981)는 흙-벤토나이트 차수재에 관한 연구로 인공 혼합차수재 개발에 중요한 역할을 하였다. 그리고 국내에서는 신은철 등(1998), 정하익 등(1993)이 폐석화-점토 및 플라이애쉬-화강풍화토의 차수재 대한 연구를,

이진수 등(2002,2003)과 김대만 등(2006)은 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적특성에 대하여 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 토목구조물 시공에 적합한 혼합토의 기준을 제시함에 있어서 기초적 자료를 제공하는 것을 목적으로 하상재료에 투수저감 효과가 뛰어난 벤토나이트를 일정한 비율로 혼합한 혼합토에 대하여 일축압축강도, 인장강도, 전단강도시험, 투수시험을 등 일련의 시험을 수행하였으며, 벤토나이트 혼합토의 강도-투수특성에 대하여 비교-검토 하였다.

2. 시험개요

2.1 시험재료의 선정

본 연구에 사용된 현장 시험재료는 B댐 시공현장 부근에서 채취한 댐축조재료로 사용된 하상시료를 사용하였다. 현장시료는 최대입경이 75mm이하인 시료로서 비중이 2.62, 마모율 38.9%, 흡수량 0.81%이다. 실내시험에 사용한 시료는 현장에서 채취한 시료를 건조시킨 뒤 4.75mm(No.4번체) 통과시료를 사용하였으며 물성은 표 1에 나타난 것처럼 액·소성한계는 NP이며 비중은 2.69로 나타났다. 하상시료의 자연입도분포곡선과 강도, 투수시험에 사용한 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 통일분류법으로 분류하면 현장시료는 GW, 실내시험에 사용한 No.4통과시료는 SW-SM으로 분류된다.

혼화재로서 사용한 벤토나이트는 토목용 벤토나이트로서 특성은 표 2와 같다. 벤토나이트는 물과 접촉하면 수화작용에 의해 부피가 건조상태의 13~16배까지 팽창하며 무게의 5배까지 물을 흡수하는 특성이 있다. 벤토나이트를 구성하는 점토광물은 90%이상인 몬모릴로나이트(Montmorillonite)이며 비표면적이 비교적 크다. 벤토나이트를 크게 칼슘계(Calcium)와 소듐계(Sodium)가 많이 사용되는데 그 중에서도 수밀성과 수화성이 우수한 소듐계 벤토나이트를 사용함으로써 수밀성과 수화성이 우수한 차수효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 소듐계 벤토나이트를 혼화재로서 사용하였다.

2.2 시험방법 및 절차

본 연구에서는 공시체를 제작하기 위하여 No.4체 통과시료에 대하여 KS F 2345의 상대밀도시험을 실시하였다. 그 결과 최대건조단위중량은 1.932g/cm³, 최소건조단위중량은 1.518g/cm³으로 나타났다.

시험을 위한 공시체의 성형은 No.4(4.75mm) 체를 통과한 하상시료에 벤토나이트를 중량비로 0%, 1%, 2%, 3%, 4%로 증가하여 혼합한 후 직경 70mm, 높이 140mm의 성형 몰드에 공시체의 건조단위 중량이 1.932g/cm³가 되도록 다짐성형 하였다. 벤토나이트 혼합 중량은 식 (1)에 의하여 선정하였다.

표 1. 시험에 사용한 하상시료의 물리적 특성

비중 Gs	액·소성	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Cu	Cc	U.S.C.S
2.69	NP	0.09	0.44	1.04	11.56	2.07	SW-SM

표 2. 벤토나이트의 일반적 특성

함수비 (%)	팽윤도 (mL/2g)	겉보기비중	PH	입도 (200mesh잔류량)(%)
12% 이하	11mL/2g 이상	0.75~0.85	11 이하	20% 이하

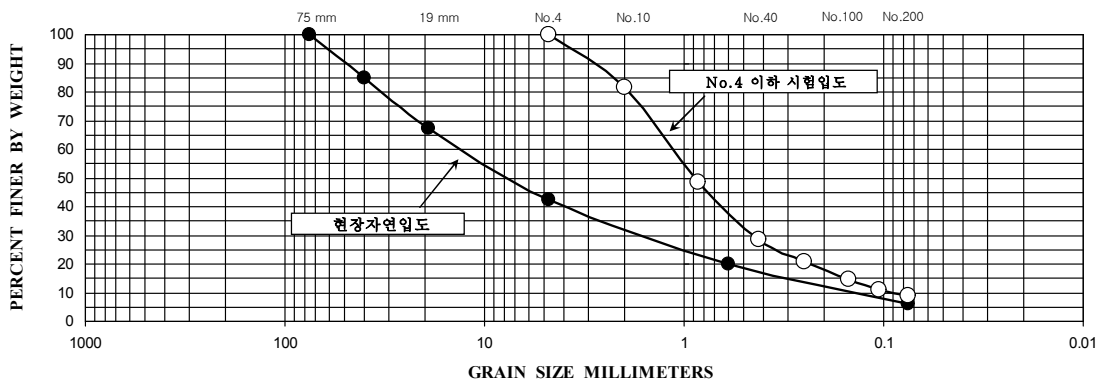


그림 1. 입도분포곡선

$$\text{혼합비}(\%) = \frac{\text{벤토나이트중량}}{(\text{건조시료중량} + \text{벤토나이트중량})} \times 100 \quad (1)$$

공시체의 균질성을 확보하기 위하여 5층으로 나누어 다짐 성형 하였으며, 또한 공시체의 층당 시료의 무게와 층당 다짐 높이가 일정하도록 성형하였다. 다짐 성형된 공시체는 일정한 자립성을 확보하도록 벤토나이트가 혼합된 하상시료를 소량의 물로 교반하여 제작하였다. 제작된 공시체는 항온항습기에서 3일간 양생한 다음 시험에 사용하였다.

공시체의 균질성을 검증하기 위하여 벤토나이트 함량이 0%인 공시체를 5층으로 나누어 다짐 층별로 절단한 후 각각의 건조단위중량과 함수비를 측정된 결과 그림 2와 같이 거의 균일한 것으로 나타났다.

시험에 사용된 시험장치는 미국 GEOCOMP사에서 제작된 것으로 삼축시험, 일축압축시험, 로셀(Rowe cell)을 이용한 압밀 등 시험이 가능한 장치로서 자동 압축장치와 압력 공급 장치로 구성되어 있다. 그림 3은 시험장비의 모식도를

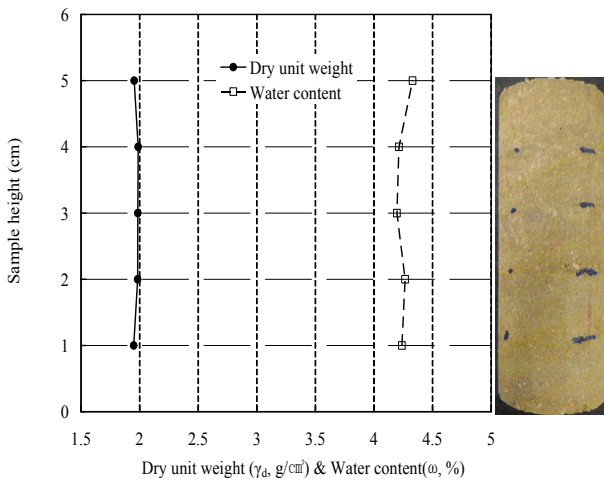


그림 2. 공시체의 층별 건조단위중량

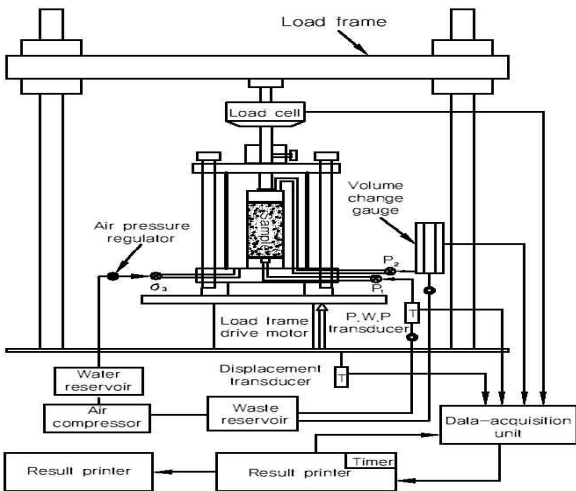


그림 3. 시험장비 모식도

나타낸 것이다.

벤토나이트 혼합토의 투수강도 특성에 대하여 알아보고자 성형된 공시체에 대하여 투수시험, 일축강도시험, 인장강도시험, 삼축압축시험을 실시하였다. 시험절차는 벤토나이트 함량별로 공시체를 제작하고 일축, 인장강도시험을 실시하였으며 삼축압축시험과 투수시험은 삼축압축시험기를 이용하여 구속압 100kPa, 200kPa, 400kPa의 조건하에서 포화, 압밀, 투수, 압축전단의 순서로 진행되었다. 이때 투수시험은 구속압 100kPa에서만 실시되었다.

공시체의 포화는 배압(back pressure)을 구속압(σ_3)보다 조금 작은 상태로 증가하면서 시료를 포화시켰다. 일반적으로 B value가 0.90 이상이면 포화된 것으로 간주하나 본 시험에서는 0.95 이상으로 포화를 시켰다. 다음 포화가 끝나면 각각 구속압 100kPa, 200kPa, 400kPa로 등방압밀 하였으며 압밀이 종료되면 전단을 실시하였다. 이때 투수시험은 구속압 100kPa에서만 실시하였으며 수두차는 시료의 양 끝에 Δp 의 압력차를 줌으로서 발생시켰다. 벤토나이트 함량이 0%, 1%에서는 10kPa의 수두차, 2%, 3%에서는 20kPa의 수두차, 4%에서는 30kPa의 수두차를 발생시켜 투수시험을 실시하였다.

3. 시험결과 및 분석

벤토나이트 혼합비 0%, 1%, 2%, 3%, 4%에 대하여 각각 일축강도, 인장강도, 투수시험, 압밀배수삼축압축(CD)시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

3.1 일축압축강도 및 인장강도 특성

강도 시험은 일축 및 인장강도시험을 실시하였으며 시험시의 재하속도는 0.5%/min으로 재하하였다. 사진 1은 일축 및 인장강도 시험에서의 공시체(1%)의 파괴 장면을 나타낸 것이다.



사진 1. 일축 및 인장강도시험 파괴장면(1%)

그림 4와 표 3은 혼합토의 벤토나이트 함량에 따른 일축압축시험 결과를 나타낸 것이다. 벤토나이트 혼합비가 증가함에 따라 일축압축강도도 134kPa(0%), 151kPa(1%), 216kPa(2%), 234kPa(3%), 286kPa(4%)로 증가하는 것으로 나타났다.

일축압축강도는 벤토나이트함량이 0%인 경우에 비하여 벤토나이트 함량이 1%에서는 1.13배, 2%에서는 1.61배, 3%에서는 1.75배, 4%에서는 2.14배로 증가하는 것으로 나타났다. 일축압축강도뿐만 아니라 최대강도 발현시의 파괴변형률도 벤토나이트함량이 증가함에 따라 0%에 비하여 1%에서 1.03배, 2%에서 1.15배, 3%에서 1.17배, 4%에서 1.18배로 증가한 값을 보이고 있다. 벤토나이트를 첨가한 경우 벤토나이트 함량이 0%인 경우에 비하여 약 1.1~2.1배 정도

큰 강도를 보이고 있는데 이는 입경이 작은 벤토나이트가 시료의 간극을 채워줌으로서 점착력을 제공해주는 것에 기인한 것으로 사료된다(김수문 등, 2000; 이진수 등, 2002).

또한 이진수 등(2002)은 화강풍화토 벤토나이트 혼합토에서 벤토나이트 혼합비가 15%까지 증가함에 따라 일축압축강도도 증가하나 그 이상에서는 오히려 감소하는 결과를 얻었으며 벤토나이트 혼합토의 강도는 양생일수의 영향을 거의 받지 않는다고 보고된 바 있다.

인장시험에 적용한 공시체의 조건과 시험 결과는 표 4에 나타내었다. 표 4에서 알 수 있듯이 인장강도는 벤토나이트 함량의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 이는 일축압축강도시험에서와 마찬가지로 벤토나이트가 인장강도의 증가에 일정한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

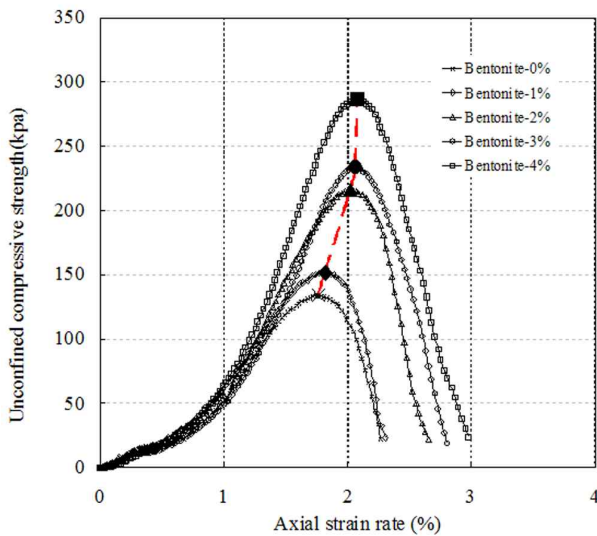


그림 4. 벤토나이트 함량에 따른 일축압축시험 결과

3.2 전단강도 특성

벤토나이트 혼합토의 전단강도특성에 대하여 고찰하고자 각각의 혼합비에 대하여 삼축압축시험을 실시하였다. 일반적으로 다짐 사질토에 대하여 비배수조건으로 전단을 실시하면 정의 다일러턴시에 의하여 부의 과잉간극수압이 발생하며 강도를 과대평가할 가능성이 있다. 그러므로 일반적으로 전응력 해석을 실시할 경우에는 어느 정도 다져진 사질토에 대하여서는 CD시험에 의하여 구한 강도를 이용하는 것이 타당하다. 이에 본 연구에서는 벤토나이트 혼합토에 대하여 구속압 100kPa, 200kPa, 400kPa의 구속압으로 각각의 시료에 대하여 배수전단시험을 실시하였다.

공시체를 충분히 포화시키기 위하여 우선 진공펌프로

표 3. 일축압축강도시험 조건 및 결과

벤토나이트 함량(%)	시료직경 D(cm)	시료높이 H(cm)	시료무게 W(g)	습윤단위중량 γ_t (g/cm ³)	함수비 ω (%)	건조단위중량 γ_d (g/cm ³)	최대강도 q_u (kPa)	탄성계수 E_{50} (kPa)	파괴변형률 ϵ_f (%)
0	7.04	14.52	1133.30	2.008	3.842	1.934	134.093	14241.25	1.766
1	7.01	14.50	1133.80	2.024		1.949	151.633	12315.63	1.819
2	6.95	14.61	1127.80	2.034		1.959	216.134	18044.98	2.023
3	7.04	14.73	1150.50	2.007		1.933	234.090	19146.34	2.063
4	6.97	14.67	1129.00	2.016		1.942	286.932	24378.11	2.079

표 4. 인장강도시험 조건 및 결과

벤토나이트 함량(%)	시료직경 D(cm)	시료높이 H(cm)	시료무게 W(g)	습윤단위중량 γ_t (g/cm ³)	함수비 ω (%)	건조단위중량 γ_d (g/cm ³)	최대강도 q_u (kPa)
0	6.98	8.48	653.6	2.01	3.842	1.937	9.763
1	7.03	14.62	1140.9	2.01		1.936	10.808
2	7.00	14.70	1135.4	2.01		1.932	14.198
3	6.96	14.70	1136.3	2.03		1.957	15.174
4	6.98	14.60	1131.9	2.03		1.952	18.228

공시체 및 멤브레인사이의 공기를 제거하는 동시에 탈기수를 순환시키면서 일차적으로 포화시킨 다음 시험장비에 삼축압축셀을 설치하여 back pressure를 증가하면서 간극수압을 측정하여 간극수압이 일정해지면 구속압을 증가하여

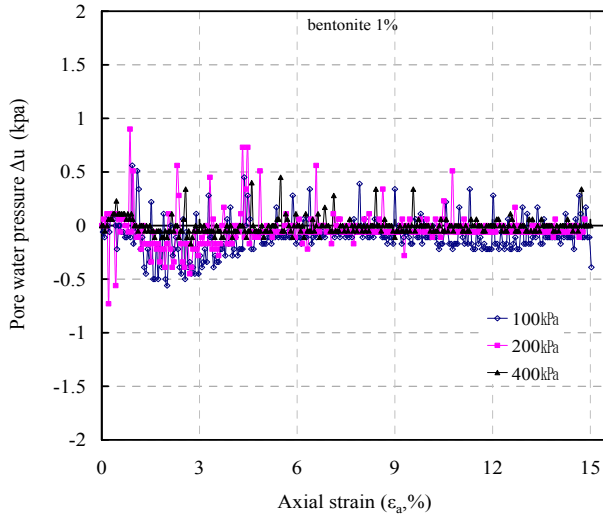


그림 5. 배수전단시험 시 발생 간극수압(1%)



사진 2. 삼축시험 파괴장면(1%)

구속압의 증가에 따른 간극수압의 변화를 측정하는 방법으로 B value($B = \Delta u / \Delta \sigma_3$)를 체크하였다. 소정의 포화도에 도달하면 24시간동안 일정한 구속압으로 등방압밀을 실시하였다.

전단과정에서는 전단속도를 0.032%/min으로 충분히 작게 하여 재하에 의한 과잉간극수압이 발생하지 않도록 하였다. 그림 5는 배수전단시험 진행과정에서 발생한 간극수압 측정결과를 그래프로 예시한 것이다. 그림 5로부터 알 수 있듯이 발생한 간극수압은 최대 0.9kPa 정도로 작게 나타나 시험결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

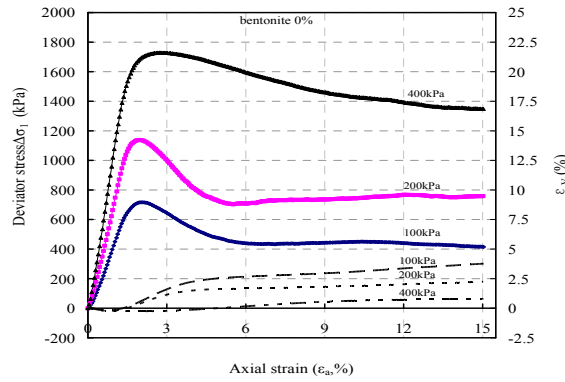
그림 6은 각각의 벤토나이트 혼합비에서의 축변형률에 대한 축차응력 및 체적변형률의 관계를 도시한 것이다. 그림 6으로부터 알 수 있듯이 모든 배합비에서 변형초기에서 거의 선형적인 응력의 증가를 보인다. 축차응력은 최대축차응력 발현 후 낮은 구속압, 낮은 벤토나이트함량에서는 급격한 감소를 보이다가 구속압, 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 점차 완만한 경사로 감소하는 것으로 나타났다.

표 5와 같이 최대축차응력은 벤토나이트함량 0%의 경우 축변형률 1.97%~2.71%에서 발생하고 있으며 1%인 경우 1.73%~2.15%, 2%인 경우 1.95%~3.58%, 3%인 경우 2.49%~4.35%, 4%인 경우 3.28~6.10%에서 최대축차응력이 발생하고 있어 벤토나이트 함량의 증가에 따라 최대축차응력 발현 축차변형률이 증가하고 있는 것으로 나타났다. 축변형률에 대한 체적압축변형률은 축변형률 초기에 약간 발생하고 있으며 최대압축변형을 보인 후 체적팽창이 발생하는 것으로 나타나고 있는데 이는 다일러턴스 현상에 기인한 것으로 사료된다.

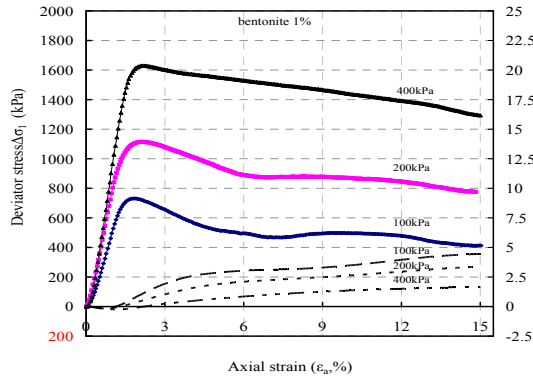
표 6은 배수전단시험에 혼합토의 전단강도정수 및 전단강도를 나타낸 것이다. 벤토나이트 함량 변화에 따른 전단강도정수 점착력과 내부마찰각의 변화를 살펴보면 0%인 경우 점착력 109.1kPa, 내부마찰각 38.76°로 나타났으며 1%인 경우에는 0%인 경우에 비하여 점착력은 119.37kPa로 조금 크게 나타났으며 내부마찰각은 36.86°로 작은 값을 보이고 있다. 2%, 3%, 4%에서는 점착력과 내부마찰각이 대체로

표 5. 벤토나이트 함량에 따른 최대축차응력 및 파괴변형률

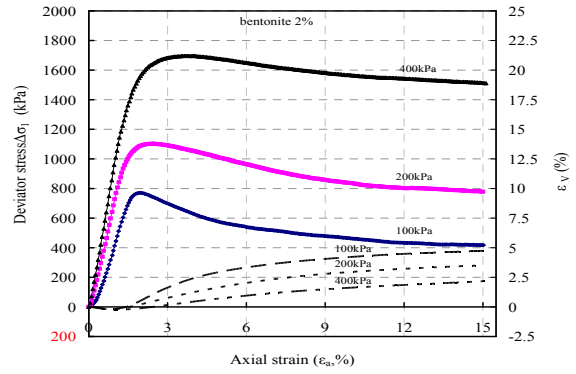
벤토나이트 함량 (%)	구분	구속압					
		100kPa		200kPa		400kPa	
		최대축차응력(kPa)	파괴변형률(%)	최대축차응력(kPa)	파괴변형률(%)	최대축차응력(kPa)	파괴변형률(%)
0		749.32	1.97	1192.40	1.92	1767.63	2.71
1		741.88	1.73	1135.34	2.11	1653.56	2.15
2		778.37	1.95	1131.40	2.32	1713.48	3.58
3		756.66	2.49	1127.39	2.48	1705.21	4.35
4		782.50	3.28	1128.56	4.21	1721.99	6.10



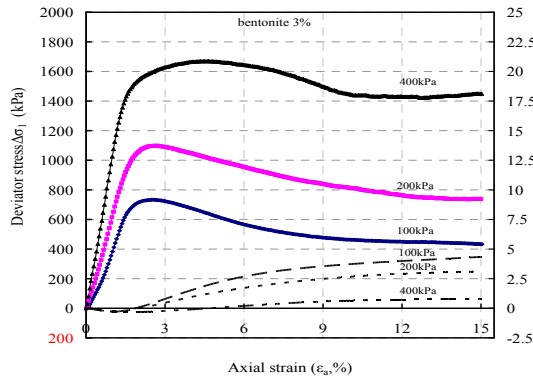
(a) Bentonite 0%



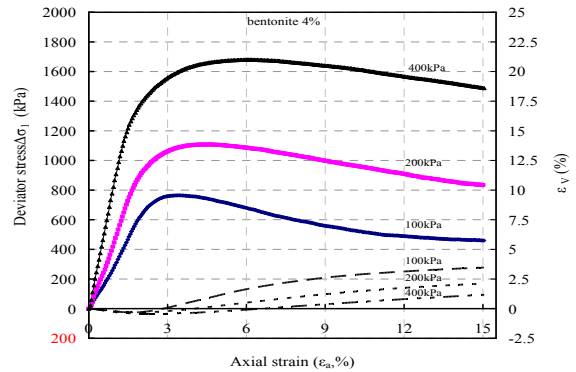
(b) Bentonite 1%



(c) Bentonite 2%



(d) Bentonite 3%



(e) Bentonite 4%

그림 6. 벤토나이트 함량에 따른 응력-변형률 관계

표 6. 벤토나이트 함량에 따른 전단강도정수 및 전단강도

구분 벤토나이트 함량	점착력 (c_d , kPa)	내부마찰각 (ϕ_d , deg)	전단강도(kPa)		
			100kPa	200kPa	400kPa
0%	109.10	38.76	189.39	269.68	430.25
1%	119.37	36.86	194.33	269.29	419.22
2%	120.17	37.39	196.59	273.02	425.86
3%	114.59	37.60	191.61	268.62	422.65
4%	119.62	37.49	196.33	273.04	426.46

비슷한 값을 나타내고 있으며 벤토나이트 함량이 1%인 경우와 마찬가지로 0%에 비하여 점착력은 조금 큰 값을, 내부 마찰각은 작은 값을 나타내고 있다. 이는 세립분의 함량증가에 따른 영향을 받은 것으로 사료된다(김종렬 등, 2001).

Mohr-Coulomb의 파괴기준인 파괴포락선 식 $[\tau = c + \sigma \tan \phi]$ 를 이용하여 배수 전단강도 (S_d)를 산정한 결과를 그림 7과 같이 나타내었다. 그림 7로부터 알 수 있듯이 같은 구속압하에서 전단강도는 벤토나이트 함량의 증가에 따라

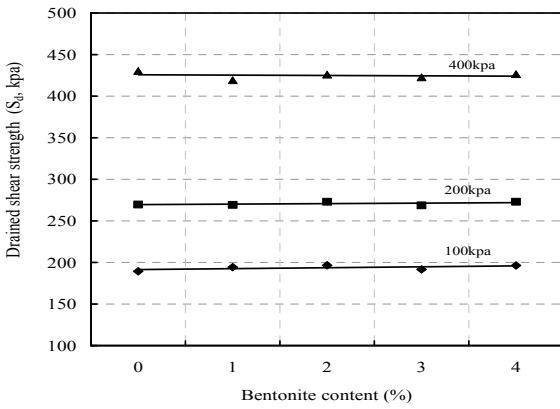


그림 7. 벤토나이트 함량에 따른 전단강도

약간의 증가를 보이기는 하나 전반적으로 큰 폭의 변화를 보이지 않고 근접한 값을 보이고 있다. 또한 구속압의 증가에 따라 전단강도도 증가하는 것으로 나타났다.

상기의 강도시험 결과로부터 낮은 함수상태에서 실시된 일축압축강도와 인장강도는 벤토나이트 함량이 높아짐에 따라 증가하는 것으로 나타났으나, 포화상태에서의 실시된 삼축압축시험에 의한 전단강도는 큰 변화가 없는 것으로 나타나 벤토나이트 혼합토의 강도는 함수상태에 따라 서로 다른 경향을 나타낼 것으로 사료된다.

3.3 투수특성

하상시료와 벤토나이트 혼합토의 투수시험 결과를 나타내면 표 7과 같다. 벤토나이트 혼합토의 투수계수는 벤토나이트 함량이 커질수록 감소하는 경향을 나타내고 있다.

그림 8은 본 연구에서의 시험결과와 이진수 등(2003)이 수행한 소디움계 벤토나이트-화강풍화토(SM) 혼합토에 대한 투수시험 결과를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 벤토나이트-화강풍화토 혼합토의 투수계수는 벤토나이트 함량이 6%까지 큰 감소폭을 보이고 있으나 그 이상의 혼합비에서 감소폭이 적어지는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 벤토나이트 함량이 0%에서 4%까지의 혼합비에서 유사한 거동을 나타내고 있음을 알 수 있었으며 벤토나이트 함량이 증가에 따라 투수계수도 수렴 될 것으로 사료된다.

표 7. 벤토나이트 혼합토의 투수계수

벤토나이트 함량	투수계수(cm/sec)	구속압(kPa)
0%	3.549E-04	100
1%	6.647E-05	
2%	9.850E-06	
3%	6.066E-07	
4%	2.085E-07	

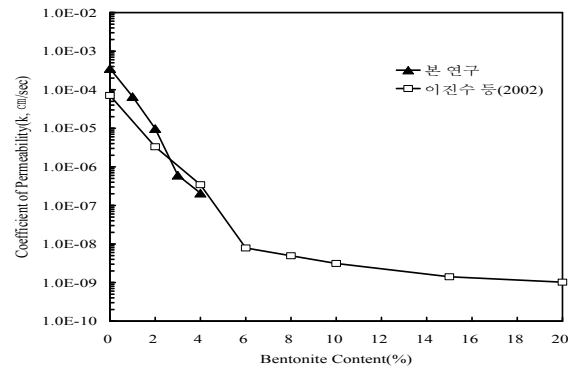


그림 8. 벤토나이트 함량에 따른 투수계수

4. 결론

본 연구에서는 하상시료에 벤토나이트 혼합비를 달리하여 일축, 인장, 삼축압축시험 및 투수시험을 실시하여 벤토나이트 함량에 따른 혼합토의 강도·투수특성에 대하여 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 벤토나이트 함량이 0%, 1%, 2%, 3%, 4%로 높아질수록 일축압축강도 및 인장강도 모두 증가하는 것으로 나타났다. 파괴시의 변형률도 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 삼축압축시험에서 벤토나이트 함량이 0%, 1%, 2%, 3%, 4%로 높아질수록 최대축차응력 및 최대축차응력 발현축변형률은 증가하고 있는 것으로, 전단강도정수인 점착력, 내부마찰각은 서로 근사한 값을 갖는 것으로 나타났다.
- (3) 벤토나이트 함량의 변화에 따른 삼축압축시험 결과로부터 산정된 전단강도정수를 이용하여 전단강도를 산정한 결과 벤토나이트 함량이 0~4%에의 전단강도는 큰 변화를 나타내지 않고 있어 벤토나이트 함량 변화의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.
- (4) 벤토나이트 혼합토의 투수시험 결과 투수계수는 벤토나이트 함량이 0%에서 3.549E-04cm/sec, 1%에서 6.647E-05 cm/sec, 2%에서 9.850E-06cm/sec, 3%에서 6.066E-07 cm/sec, 4%에서 2.085E-07cm/sec로 나타나 벤토나이트 함량이 4%정도에서 차수재의 기준 $k=1 \times 10^{-7}$ cm/sec에 가까운 값을 가지는 것으로 나타났다.
- (5) 낮은 함수상태에서 실시된 일축압축강도와 인장강도는 벤토나이트 함량이 높아짐에 따라 증가하는 반면 포화상태에서의 실시된 삼축압축시험에 의한 전단강도는 큰 변화가 없는 것으로 나타나 벤토나이트 혼합토의 강도는 함수상태의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.
- (6) 상기의 결과들은 벤토나이트 함량이 비교적 적은 경우

에 대한 것이다. 추후 높은 벤토나이트 함량, 벤토나이트 혼합토의 함수상태에 따른 투수·강도특성에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 김대만, 김기영 (2006), 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성, *한국지반환경공학회논문집*, Vol. 7, No. 6, pp. 45~56.
2. 김수문, 엄희남, 임남웅 (2000), 벤토나이트와 시멘트가 매립장 차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향(I), *대한환경공학회지*, Vol. 22, No. 3, pp. 495~504.
3. 김종렬, 이용희, 이진수 (2001), 세립분의 함유량이 다짐강화토의 역학적 특성에 미치는 영향, *대한토목학회논문집*, Vol. 21, No. 4-C, pp. 465~470.
4. 신은철, 김성환 (1998), 폐석회의 점토차수재로서 활용에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, Vol. 14, No. 5, pp. 29~38.
5. 이진수, 정광옥 (2002), 벤토나이트 혼합토의 공학적 특성 연구, *공업기술연구*, 동신대학교 *공업기술연구소*, Vol. 8, No. 1, pp. 61~70.
6. 이진수, 이승철 (2003), 화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 투수특성, *공업기술연구*, 동신대학교 *공업기술연구소*, Vol. 9, No. 1, pp. 29~38.
7. 정하익, 장연수 (1993), 폐기물 매립장의 차폐재와 침출 화학성분과의 상호작용분석, *한국지반공학회논문집*, Vol. 9, No. 3, pp. 49~60.
8. 日本土質工学会 (1983), *フィルダムの調査設計から施工まで, 現場技術者のための土の基礎シリーズ 7*, 土質工学会, pp. 119~120.
9. Auvinet, G. Y. and Hiriart, G. (1980), An Artificial Cooling Pond for the Rio Escondido Coal Fired Power Plant, *Proceedings, ASCE Symposium on Surface Water Impoundments*, Minneapolis, Vol. 2, pp. 1089~1098.
10. Chapuis, R. P. (1981), Permeability Testing of Soil-Bentonite Mixtures, *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 4, pp. 744~745.
11. Lundgren, T. A. (1981), Some Bentonite Sealants in Soil Mixed Blankets, *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 2, pp. 349~354.

(접수일: 2009. 10. 7, 심사일: 2009. 11. 18, 심사완료일: 2010. 3. 8)