

## Soil-Bentonite 혼합토의 강도 특성 Strength Characteristics of Soil-Bentonite Mixture

김광일<sup>1)</sup>, Guang-Ri Jin, 신동훈<sup>2)</sup>, Dong-Hoon Shin, 임은상<sup>2)</sup>, Eun-Sang Im, 김기영<sup>2)</sup>, Ki-Young Kim

<sup>1)</sup> 한국수자원연구원 지반구조연구소 연구원, Researcher, Geotechnics&Structures Research Center, Kwater

<sup>2)</sup> 한국수자원연구원 지반구조연구소 책임연구원, Principal Researcher, Geotechnics&Structures Research Center, Kwater

**SYNOPSIS** : A soil mixture with low permeability and bentonite as an additive has been highly utilized as a cutoff material in landfills, banks, and dams. Even though it is anticipated that the water can seep through shear failures in the filter layer due to external loads and embankment loads during construction, usually only the coefficient of permeability of the soil mixture is considered rather than the changes of strength from the different amounts of additives. Therefore, the amount of bentonite was changed between 0%~4% in the soil mixture of the bed material to conduct a series of unconfined compressive strength, tensile strength, and shear strength tests on a specimen in order to study the characteristics of the strength. In the result, the unconfined compressive and tensile strength were increased along with the increased amount of bentonite in the low water content; however, the tensile strength in the consolidated-drained shear test generally showed similar values without significant changes.

**Keywords** : Bentonite, Soil-Bentonite Mixture, Unconfined compressive strength, Tensile strength, Shear strength

### 1. 서론

불투수성 재료의 판단기준은 일반적으로 투수계수가  $10^{-7}$ cm/sec인 재료를 적용한다. 그러나 이와 같이 현장 여건상 양질의 저투수성을 가지는 자연상태의 점성토를 대량으로 확보하는 것은 어려우며 또한 경제적으로도 비용이 많이 든다. 그러므로 소정의 기준을 만족하는 저투수성 재료를 확보하기 위하여 수밀성이 우수한 혼화재를 저투수성을 필요로 하는 현장부근 자연상태의 흙 시료에 혼합하여 사용하는 방법이 많이 이용되어지고 있다. 일반적으로 저투수성의 재료로서 벤토나이트를 혼화재로 사용한 혼합토가 매립장, 제방, 댐 등의 차수재로 많이 이용되어지고 있다. 그러나 시공 시 외부하중, 성토하중 등에 의한 차수층의 전단파괴가 발생하여 침투수의 침투 등이 예상 되지만 일반적으로 혼합토의 투수계수만 고려할 뿐 혼화재 량에 따른 강도변화는 고려하지 않고 있는 실정이다.

1970년대에 이르러 지반공학 분야에서 매립장 등 차수재의 개발에 관심을 가지기 시작하여 Auvinet와 Hiriart(1980)는 점토 차수재에 관한 연구를 하였고, Lundgren(1981)과 Chapuis(1981)는 흙-벤토나이트 차수재에 관한 연구로 인공혼합차수재 개발에 중요한 역할을 하였다. 그리고 국내에서는 신은철 등(1998)과 정하익 등(1993) 등이 폐석회-점토 및 플라이애쉬-화강풍화토의 차수재, 김대만 등(2006)이 화강풍화토-벤토나이트 혼합토 공학적특성에 대하여 연구를 수행하였다.

이에 본 연구에서는 벤토나이트 함량에 따른 혼합토의 강도특성에 대하여 고찰하고자 하상토사에 벤토나이트 혼합비를 달리하여 공시체를 제작하였으며 혼합비에 따른 일축압축강도, 인장강도 및 전단강

도시험을 실시하고 그 강도 특성을 비교·검토 하였다.

## 2. 시험재료 및 시험방법

### 2.1 시험재료

본 연구에서는 00담 시공현장 부근에서 채취한 하상시료를 사용하였다. 현장에서 채취한 시료는 건조시킨 뒤 4.75mm(No.4번체) 통과시료를 사용하였다. 시험에 사용한 시료의 액·소성한계는 NP이며 비중은 2.69로 나타났으며 하상시료의 자연입도분포곡선과 강도시험에 사용한 입도분포곡선은 다음 그림 1과 같다. 통일분류법으로 분류하면 강도시험에 사용한 No.4통과시료는 SW-SM으로 분류된다.

혼화재로서 사용한 벤토나이트의 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%이상이 montmorillonite이며 비표면적이 비교적 크다. 벤토나이트를 크게 칼슘계(Calcium)와 소듐(Sodium)계가 많이 사용되는데 그중에서도 수밀성과 수화성이 우수한 Sodium 벤토나이트를 사용함으로써 수밀성과 수화성이 우수한 차수효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Sodium계 벤토나이트를 혼화재로서 사용하였다.

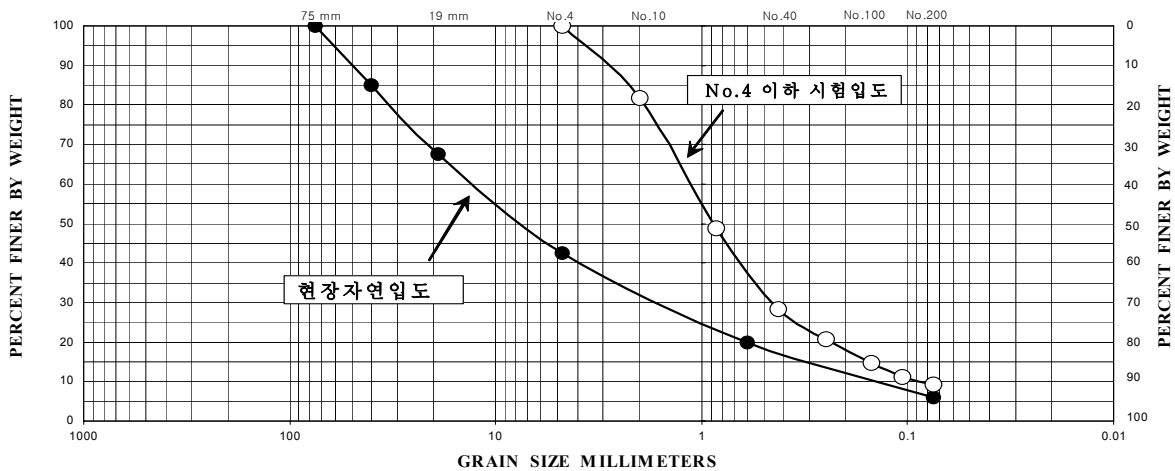


그림 1. 입도분포곡선

표 1. 시험에 사용한 하상시료의 물리적 특성

비 중 G <sub>s</sub>	액·소성	D <sub>10</sub> (mm)	D <sub>30</sub> (mm)	D <sub>60</sub> (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

수 분(%)	팽윤도(ml/g)	겉보기비중	PH	입 도 (200mesh잔류량)(%)
12% 이하	11ml/g 이상	11ml/g 이상	11 이하	20% 이하

## 2.2 공시체 성형 및 시험 방법

본 연구에서는 공시체를 제작하기 위하여 No.4체 통과시료에 대하여 KS F 2345의 상대밀도시험을 실시하였으며 그 결과 최대건조단위중량  $1.932\text{g}/\text{cm}^3$ , 최소건조단위중량  $1.518\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 나타났다.

강도시험을 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 성형몰드에 공시체의 건조단위 중량이  $1.932\text{g}/\text{cm}^3$ 가 되도록 다짐성형 하였다. 벤토나이트 혼합 중량은 식(1)에 의하여 산정하였다.

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

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 하상 시료를 소량(함수비-3.8%)의 물로 교반하여 제작하였다. 제작된 공시체는 항온·습습기에서 3일간 양생한 다음 시험에 사용하였다.

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

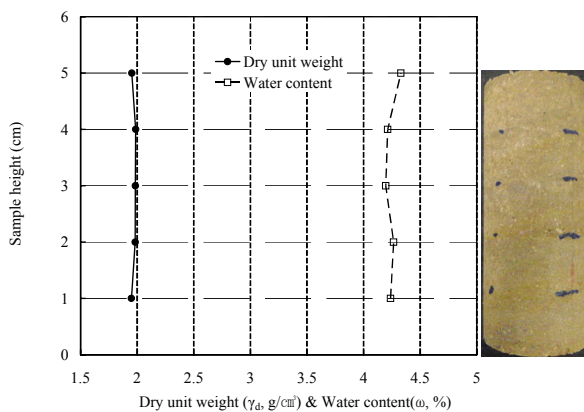


그림 2. 공시체의 층별 건조단위중량

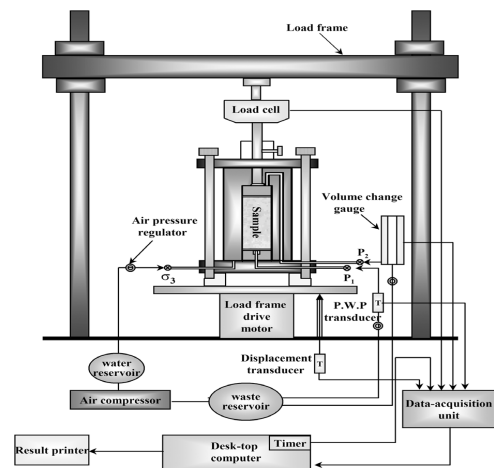


그림 3. 시험장비 모식도(김대만, 2006)

벤토나이트 혼합토의 강도 및 전단강도 특성에 대하여 알아보고자 성형된 공시체에 대하여 일축강도시험, 인장강도시험, 삼축압축시험을 실시하였으며 표 3은 각종 강도시험에 대한 시험 규격을 나타낸 것이다.

표 3. 시험항목 및 시험방법

시험항목	시험규격
일축압축강도시험	JGS 0511(KS F 2314)
인장강도시험	Brazilian test
삼축압축시험(CD)	JGS 0524

시험에 사용된 시험장치는 미국 GEOCOMP에서 제작된 것으로 삼축시험, 일축압축시험, Rowe cell를 이용한 압밀등 시험이 가능한 장치로서 자동 압축장치와 압력공급 장치로 구성되어 있다. 그림 3은 시험기기의 모식도를 나타낸 것이다.

### 3. 시험결과 및 분석

벤토나이트 혼합토의 강도 특성에 대하여 알아보하고자 벤토나이트 혼합비 0%, 1%, 2%, 3%, 4%에 대하여 각각 일축강도, 인장강도, 압밀배수삼축압축(CD)시험을 실시하였다.

#### 3.1 일축압축강도 및 인장강도

강도 시험은 우선 일축 및 인장강도시험을 실시하였으며 시험의 재하속도는 0.5%/min으로 재하 하였다. 사진 1은 일축 및 인장강도시험에서의 공시체(1%)의 파괴 장면을 나타낸 것이다.

아래 그림 4와 표 4는 혼합토의 벤토나이트 함량에 따른 일축압축시험 결과를 나타낸 것이다. 벤토나이트 혼합비가가 증가함에 따라 일축압축강도도 134KPa(0%), 151KPa(1%), 216(2%), 234(3%), 286(4%)로 증가하는 것으로 나타났다. 일축압축강도뿐만 아니라 최대강도 발현시의 파괴변형률도 벤토나이트함량이 증가함에 따라 4%시 0%에 비하여 소폭으로 증가한 1.18배 큰 값으로 나타났다. 벤토나이트 함량이 4%인 경우 벤토나이트 함량이 0%인 경우에 비하여 약 2배정도 큰 강도를 보이고 있는데 이는 입경이 작은 벤토나이트가 시료의 간극을 채워줌으로서 점착력을 제공해주는 것에 기인한 것으로 사료된다(이진수, 2002; 김수문, 1999). 표 4는 일축압축시험에 적용한 공시체의 상태와 시험결과를 요약하여 나타낸 것이다.



사진 1. 일축 및 인장강도시험 파괴장면(1%)

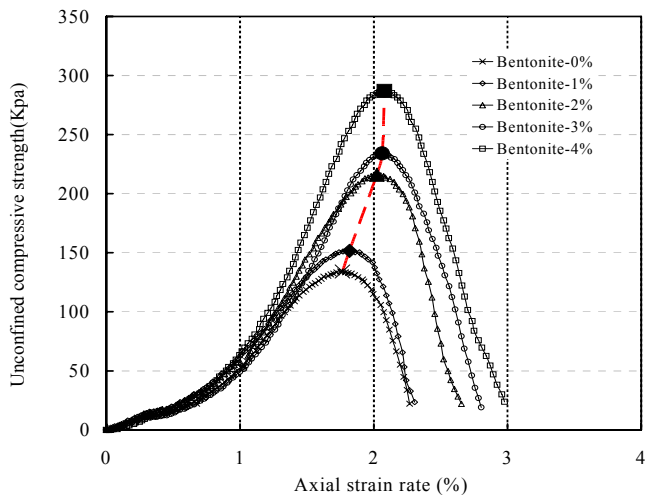


그림 4. 벤토나이트 함량에 따른 일축압축시험 결과

표 4. 일축압축강도시험 조건 및 결과

벤토나이트 함량(%)	시료직경 D(cm)	시료높이 H(cm)	시료무게 W(g)	습윤단위중량 $\gamma_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	함수비 $\omega$ (%)	건조단위중량 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	최대강도 $q_u$ (KPa)	탄성계수 $E_{50}$ (KPa)	파괴변형률 $\epsilon_f$ (%)
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

인장시험에 적용한 공시체의 조건과 시험 결과는 표 5에 나타내었다. 표 5에서 알 수 있듯이 인장강도는 벤토나이트함량의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 이는 일축압축강도시험에서와 마찬가지로 벤토나이트가 인장강도의 증가에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

표 5. 인장강도시험 조건 및 결과

벤토나이트 함량(%)	시료직경 D(cm)	시료높이 H(cm)	시료무게 W(g)	습윤단위중량 $\gamma_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	함수비 $\omega$ (%)	건조단위중량 $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	최대강도 $q_t$ (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

### 3.2 전단강도

다음 벤토나이트 혼합토의 전단강도특성에 대하여 고찰하고자 각각의 혼합비에 대하여 삼축압축시험을 실시하였다. 일반적으로 다짐 사질토에 대하여 배수조건으로 전단을 실시하면 정의 다일러턴시에 의하여 부의 과잉간극수압이 발생하며 강도를 과대평가할 가능성이 있다. 그러므로 일반적으로 전응력 해석을 실시할 경우에는 어느 정도 다짐된 사질토에 대하여서는 어느 정도 다져진 사질토에 대하여서는 CD시험에 의하여 구한 강도를 이용하는 것이 타당하다.

이에 본 연구에서는 벤토나이트 혼합토에 대하여 구속압 10KPa, 200KPa, 400KPa의 구속압으로 각각의 시료에 대하여 배수전단시험을 실시하였다.

공시체를 충분히 포화시키기 위하여 우선 진공펌프로 공시체 및 멤브레인사이의 공기를 제거하는 동시에 탈기수를 순환시키면서 일차적으로 포화시킨 다음 시험장비에 삼축압축셀을 설치하여 back pressure를 증가하면서 간극수압을 측정하여 간극수압이 일정해지면 구속압을 증가하여 구속압의 증가에 따른 간극수압의 변화를 측정하는 방법으로 B value( $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$ )를 체크하였다. 일반적으로 B 값이 0.90이상이면 포화된 것으로 하나 본 연구에서는 공시체를 0.95이상으로 포화시켰다. 만약 포화도가 소정의 값에 도달하지 못하면 상기의 과정을 반복하여 최종적으로  $P_2=600KPa$ 의 압력으로 B값이 0.95 이상이 되도록 하였다. 다음 24시간동안 소정의 구속압으로 압밀한 다음 전단하였다.

전단과정에서는 전단속도를 0.032%/min으로 충분히 작게 하여 재하에 의한 과잉간극수압이 발생하지 않도록 하였다. 아래 그림 5는 배수전단시험 진행 과정에서 발생한 간극수압 측정결과(1%)를 그래프로 예시한 것이다. 그림 5로부터 알 수 있듯이 발생한 간극수압은 최대 0.9KPa 정도로 작게 나타나 시험결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

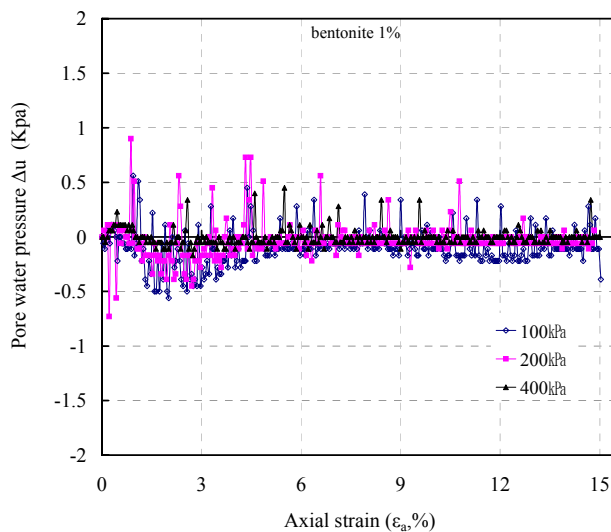


그림 5. 수전단시험 시 발생 간극수압(1%)



사진 2 삼축시험 파괴장면(1%)

그림 6은 각각의 벤토나이트 혼합비에서의 축변형률에 대한 축차응력 및 체적변형률의 관계를 도시한 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 모든 배합비에서 변형초기에 거의 선형적인 응력의 증가를 보인다. 최대축차응력 발생 후 축차응력은 벤토나이트함량이 높아짐에 따라 급격한 감소를 보이다 점차 완만한 감소를 보이는 것으로 나타났다. 0%인 경우 축변형률이 1.97%~2.71%에서 최대축차응력이 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 발생 축차변형률이 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 파괴시의 축차응력은 구속압의 증가에 따라 크게 발생하고 있으며 파괴가 발생하는 축변형률도 비슷하거나 큰 값을 보이고 있다.

축변형률에 대한 체적압축변형률은 축변형률 초기에 조금 발생하고 있으며 최대압축변형을 보인 후 다일터턴시 현상에 의한 체적팽창이 발생하는 것으로 나타나고 있다.

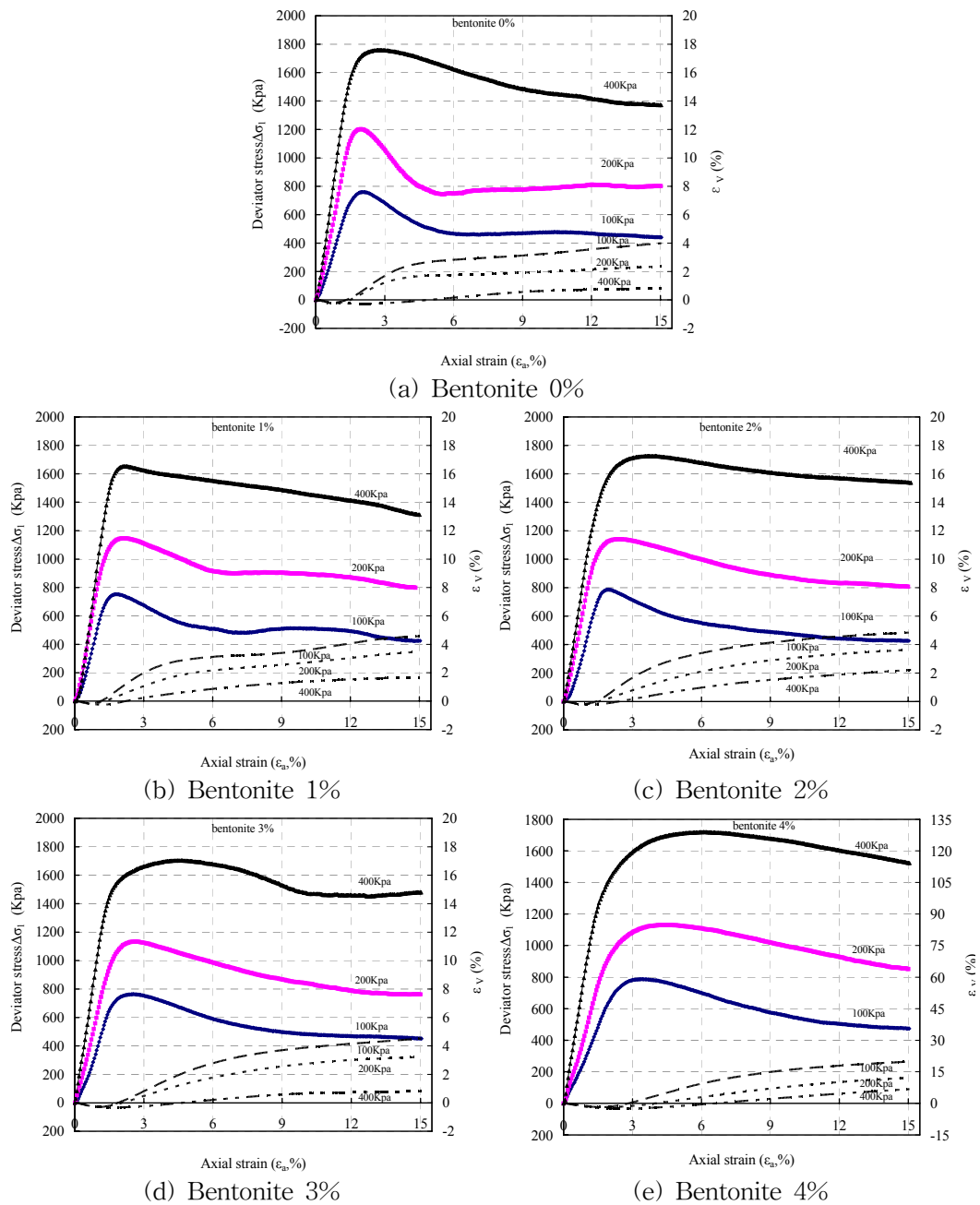


그림 6. 벤토나이트 함량에 따른 응력-변형률 관계

표 6. 벤토나이트 함량에 따른 최대축차응력 및 파괴변형률

벤토나이트 함량 (%)	구분	구속압(KPa)					
		100		200		400	
		최대축차 응력(KPa)	파괴변형률 (%)	최대축차 응력(KPa)	파괴변형률 (%)	최대축차 응력(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

표 7. 벤토나이트 함량에 따른 전단강도정수 및 전단강도

벤토나이트 함량(%)	구분	전단강도정수		전단강도( $S_d$ , KPa)		
		점착력 ( $c_d$ , Kpa)	내부마찰각 ( $\phi_d$ , deg)	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

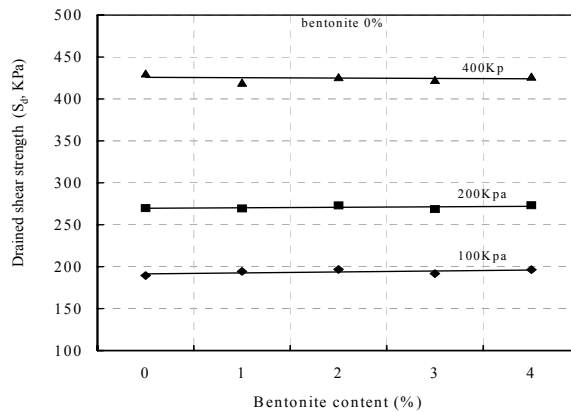


그림 7. 벤토나이트 함량에 따른 전단강도

표 7은 각 혼합비에 따른 배수전단시험에 의한 전단강도정수를 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 점착력이 119.37KPa로 조금 크게 나타났으며 내부마찰각은 36.86°로 0%인 경우에 비하여 작은 값을 보이고 있다. 2%, 3%, 4%에서는 점착력과 내부마찰각이 대체로 비슷한 값을 나타내고 있지만 0%인 경우에 비하여 점착력은 조금 큰 값을, 내부마찰각은 작은 값을 나타내고 있다. 세립분의 함량증가에 따른 영향을 받은 것으로 사료된다(김종렬, 2001). 하지만 전반적으로 전단강도정수의 큰 변화는 볼 수 없었다.

Mohr-Coulomb의 파괴기준인 파괴포락선 식  $[\tau = c + \sigma \tan \phi]$ 를 이용하여 배수 전단강도 ( $S_d$ )를 산정한 결과를 그림 7과 같이 나타내었다. 그림 6으로부터 알 수 있듯이 전단강도는 벤토나이트 함량의 증가에 따라 약간의 증가를 보이기는 하나 전반적으로 큰 폭의 변화를 보이지 않고 있다. 여기서 벤토나이트 함량 3%에서 전단강도가 증가하는 추세를 보이다 작은 값을 보이고 있는데 이는 시험과정에서의 오차로 사료된다. 구속압 100KPa에서 평균 193.65KPa, 200KPa에서 270.73KPa, 400KPa에서 424.89KPa의 값으로 구속압의 증가에 따라 전단강도도 증가하는 것으로 나타났다.

상기의 강도시험 결과로부터 낮은 함수상태에서의 일축압축강도와 인장강도는 벤토나이트 함량이 높아짐에 따라 증가하는 것으로 나타났으며 포화상태에서의 전단강도는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 벤토나이트 혼합토에 대한 일련의 강도시험을 수행하여 벤토나이트 함량이 강도에 미치는 영향을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 혼합토의 벤토나이트 함량이 0%, 1%, 2%, 3%, 4%로 높아질수록 일축압축 및 인장강도 모두 2배정도로, 일축압축 파괴변형률도 1.766~2.079%로 증가하는 것으로 나타났다.
2. 배수삼축압축시험에서 벤토나이트 함량이 0%, 1%, 2%, 3%, 4%로 높아질수록 최대축차응력 발현 축변형률은 증가하고 있는 것으로 나타났으며 함량이 동일한 경우 구속압이 증가에 따라 최대축차응력 및 최대축차응력 발현 축변형률도 증가하는 것으로 나타났다.
3. 벤토나이트 함량의 변화에 따른 전단시험 결과로부터 산정된 전단강도정수를 이용하여 전단강도를 산정한 결과 전반적으로 전단강도의 큰 변화는 나타나지 않았다.
4. 상기의 결과들은 벤토나이트 함량이 비교적 적은 경우에 대한 것이며 추후 높은 벤토나이트 함량에 따른 강도특성 등에 대한 추가적인 시험이 필요할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 김대만, 김기영(2006), “화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성”, **한국지반환경공학회 논문집**, 제7권 제6호 2006년 12월 pp. 45~56.
2. 김수문, 염희남, 임남웅(2000), “벤토나이트와 시멘트가 매립장 차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향(I)”, **大韓環境工學會誌**, Vol. 22, No. 3, pp. 495~504.
3. 김종렬, 이용희 이진수(2001), “세립분의 함유량이 다짐강화토의 역학적 특성에 미치는 영향”, **대한토목학회논문집**, 제 21권 제4-C호, pp. 465~470.
4. 신은철, 김성환(1998), “폐석회의 점토차수재로서 활용에 관한 연구”, **한국지반공학회논문집**, 한국지반공학회, 제14권, 제5호, pp. 29~38.
5. 이진수, 정광옥(2002), “벤토나이트 혼합토의 공학적 특성 연구”, **THE JOURNAL OF INDUSTRIAL RESEARCH AND TECHNOLOGY**, VOL.8. NO.1 pp. 61~70.
6. 정하익, 장연수(1993), “폐기물 매립장의 차폐재와 침출 화학성분과의 상호작용분석”, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제9권, 제3호, pp. 49~60.
7. 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.
8. Chapuis, R. P.(1981), “Permeability testing of soil-bentonite mixtures”, *Proceedings, 10th International Conference on soil mechanics and foundation engineering*, Stockholm, Vol. 4, pp. 744~745.
9. Lundgren, T. A.(1981), “Some bentonite sealants in soil mixed blankets, Proceedings”, *10th International Conference on soil mechanics and foundation engineering*, Stockholm, Vol. 2, pp. 349~354.