

Soil-Bentonite 혼합토의 불포화 투수특성 연구

김만일*

한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소

A Study on Unsaturated Permeable Properties of the Soil-Bentonite Mixtures

Man-il Kim*

Groundwater & Geotechnics Research Center, Korea Institute of Water & Environment, KOWACO

본 연구에서는 폐기물 매립장의 차수층으로 사용되는 벤토나이트 혼합토에 대한 연직침윤시험과 Frequency Domain Reflectometry 측정장비를 이용한 유전율 측정시험을 수행하였다. 표준사, 화강풍화토, 벤토나이트 재료에 대해 다양한 배합 비율을 적용하여 제작된 벤토나이트 혼합토의 체적함수비, 간극비, 유전율상수 등의 관계로부터 이들의 불포화 투수 특성을 파악하였다. 연구결과에 따르면 초기 벤토나이트 혼합비는 체적함수비 변화에 영향을 미치며, 체적함수비 변화는 간극비와 밀접한 관계를 가지고 있다. 또한 벤토나이트 혼합토의 체적함수비 변화는 유전율 반응으로부터 명확히 측정됨을 파악하였다. 벤토나이트 혼합토의 불포화 투수 특성을 파악하기 위한 본 연구에서 체적함수비와 유전율상수의 관계함수를 추정하였다.

주요어: 차수층, 벤토나이트 혼합토, 체적함수비, 간극비

This study presents the results of a laboratory investigation performed to study physical properties of soil-bentonite mixtures through the vertical permeation test and dielectric measurement test using Frequency Domain Reflectometry system for the liner of waste landfill. For the laboratory experiments, geotechnical testing was conducted on pre-mixed soil-bentonite which is consisted of standard sand, weathered granite soil and bentonite for estimating physical parameters such as a volumetric water content, void ratio and dielectric constant. In experiment results, initial soil-bentonite mixing rate has an effect of change of volumetric water content. Also change of volumetric water content of a soil-bentonite mixture is clearly detected to measure a response of dielectric constant. In order to estimate an unsaturated permeable property of soil-bentonite mixtures, equations between volumetric water content and dielectric constant were derived from this study.

Key words: liner, Soil-bentonite mixture, Volumetric water content, Void ratio

* Corresponding author : mikim916@paran.com

서 언

폐기물 매립장에서 발생하는 침출수 내지 지하수위 상승에 따른 지하수 오염, 그리고 다양한 경로로 발생될 수 있는 토양오염 문제들을 방지하기 위하여 매립장 하부에 저투수성(low permeability) 성질을 갖는 매질의 다양한 차수재를 설치한다. 일반적으로 폐기물 매립장에 사용되는 차수재의 경우 침출수의 누출을 억제하기 위하여 저투수성 물질, 즉 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec 이하의 차수재료를 사용한다(한국지반공학회, 2004; 장연수와 이광열, 2001; Tay et al., 2001). 특정 투수계수 이하를 만족하는 혼합토의 혼합비는 흙의 종류와 토질 특성에 따라 그 범위가 매우 크며, 현재 차수재로 사용하고 있는 벤토나이트 혼합토의 투수계수는 $10^{-7} \sim 10^{-11}$ cm/sec 정도의 저투수성 물질에 해당된다. 또한 벤토나이트 혼합토 차수층은 벤토나이트 혼합비에 따라 강도, 투수특성, 다짐특성 등의 토질특성에서도 큰 변화를 초래하는 것으로 알려져 있다(Knitter et al., 1993). 이러한 차수재의 침투특성 및 팽윤특성에 관해서 지금까지는 다양한 분야에서 다수의 연구가 진행되어오고 있으나, 벤토나이트 혼합토에 대한 공학적인 메카니즘 내지 물리특성 등에 대해서는 아직 부족한 부분이 존재하는 것이 사실이다.

벤토나이트와 같은 점토광물로 이루어진 차수재료의 투수계수에 영향을 미치는 주요 영향인자는 흙의 종류, 점토 함량, 입경분포 등의 재료특성과 함수비와 건조밀도, 다짐두께와 같은 현장 시공상의 방법, 마지막으로 주변 환경의 영향을 받아 차수재에 발생하는 건조균열 내지 동결융해로 인한 차수층의 손상 등으로 고려해 볼 수 있다. 이러한 영향인자에 대한 연구는 Tay et al.(2001)에 의해 체계적으로 진행되었는데, 그 결과 벤토나이트 함량 10%와 20%를 가진 재료에 대한 수리전도도의 분포는 평균적으로 3×10^{-12} m/sec 범위로써 저투수성 물질에 해당된다. 또한 건조시험에서는 벤토나이트 10%를 함유한 혼합토일 경우, 체적함수비를 증가시킬수록 건조 후 발생하는 균열(crack)의 길이와 폭이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 이와 반대로 벤토나이트 20% 함량 혼합토에서는 체적함수비 증가에 비해 균열(crack)의 길이와 폭이 벤토나이트 10% 함량 혼합토 보다 미세하게 발생하는 것으로 보고되어 있다. 이러한 연구결과로 미루어보아 벤토나이트 혼합토 등의 차수재료는 재료 내에 분포하는 체적함수비와 같은 수분 함양에 따라 차수 기능 내지 변

형이 발생할 가능성을 항상 내포하고 있는 것이다.

벤토나이트 혼합토에 대한 침윤과정 및 배수과정의 관계를 갖는 수분특성곡선에서 히스테리시스(Hysteresis) 현상에 의해 벤토나이트와 같은 점성토 계열의 매질에서는 침윤과정의 시험이 매우 어렵다. 배수과정과 침윤과정에서는 그 물을 함유할 수 있는 보수성이 다르기 때문에 실제의 현상에서 공학적인 문제로 대두되고 있는 침윤과정에 대한 연구가 절대적으로 고려되어야 한다. 또한 점성토는 수분함양 상태에 따라 팽창과 수축이 발생하는 성질을 가지고 있어 포화 침투에서의 간극비 변화는 투수계수에 영향을 주는 인자가 된다. 또한 불포화침투에 대해서도 그 변형을 고려한 수분특성을 파악할 필요성이 있다. 이광열(2001)과 김영수 등(2001)에 의하면 벤토나이트 혼합비의 증가에 따라 건조밀도는 감소하고 그에 따른 최적함수비는 증가함을 나타내는데 이는 벤토나이트의 비중과 수화성에 기인한 것으로 보고되어 있다. 특히 낮은 벤토나이트 혼합비에서는 투수계수가 현저하게 감소하지만, 일정 수준을 지나면 혼합비를 증가시켜도 투수성의 감소 효과는 적게 나타났으며, 혼합비와 투수계수의 관계는 지수함수 관계를 가진다(류권과 채교익, 2000). 이와 같이 매립장 현장에서 불포화 상태로 시공되어 있는 차수재료의 시공 직후, 재관수(再冠水, reflooding)에 의해 수분상태는 장기적으로 변화하기 때문에 각각의 포화도에 대한 이들의 침투 내지 팽윤거동 특성 파악의 필요성이 절실히 요구된다. 특히 수분량 측정지점에 대해서는 현재 미량의 수분이동에 대한 측정장비 및 원위치에서의 장기적 모니터링이 가능한 계측장비가 거의 소개되어 있지 않고, 이러한 매립장 시공 후의 안전성에 대해서 체계적인 관리가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 장기간 벤토나이트 혼합토의 체적함수비 거동특성 파악을 위한 연직침윤시험을 수행함으로써 이들의 특성을 파악하여 공학적 메카니즘을 규명할 필요가 있다. 또한 고주파수인 0.1~1.7GHz 범위의 전자기파에 대한 인피던스 특성으로 발생하는 합성간섭파를 이용하여 매질의 유전율상수를 측정할 수 있는 Frequency Domain Reflectometry (FDR) 측정장비를 적용해 벤토나이트 혼합토의 수분 특성을 파악하였다. 특히 이 측정법은 측정프로브 주변에서 정밀한 측정이 가능하다는 점에서 넓은 범위를 갖는 매립장을 피복하게 될 차수재의 연결부위에서 발생할 수

있는 침출수 유출 유무를 인지할 수 있을 것이다. 이에 본 측정장비를 적용해 벤토나이트 혼합토로 이루어진 차수재료에 대한 침윤특성 파악 및 체적함수비 관계로부터 유전을 반응 교정곡선을 도출하기 위한 실내 시험을 수행하였다.

연직침윤시험

시험재료 및 물리적 특성

저투수 특성 확보를 위한 혼합재료로서 벤토나이트가 널리 사용되는 이유는 벤토나이트가 물과 반응하였을 때 체적팽창율(volumetric extension rate)이 높을 뿐만 아니라, 입자의 높은 비표면적과 양이온 치환능력(CEC, cation exchange capacity)으로 인한 오염물질 차폐, 이동억제, 정화 등의 목적에도 부합되기 때문이다. 벤토나이트는 스멕타이트(smectite) 계열의 광물인 몬토릴로나이트(montmorillonite)를 주성분으로 높은 양이온 교환능력, 큰 비표면적, 높은 팽창성, 낮은 투수성 등의 물리적 특성을 가지고 있다. 벤토나이트는 칼슘계(calcium)와 나트륨계(sodium)로 나뉘며 이는 광물질 형성이나 가공 또는 처리되는 동안에 점토입자 표면에 흡착되는 외부 이온의 종류에 따른다(Gleason et al., 1997). 나트륨계 벤토나이트는 칼슘계 벤토나이트보다 전단강도는 작으나, 오염물질 차폐재로서 필요한 팽창성과 투수계수 측면에서 월등히 우수하고 화학물질에 대한 재료의 내구성에서 동등한 성능을 보인다(Mitchell et al., 1995). 벤토나이트 함량에 따른 벤토나이트 혼합 차수층의 투수계수는 약 4% 이상의 벤토나이트가 혼합되었을 때, 투수계수 기준을 만족하는 것으로 나타났다(Giani, 1992). 모래질 원토와 벤토나이트를 혼합할 경우 일반적으로 5~10%의

벤토나이트가 필요하다. 특히 매립장 등에 사용할 목적으로 차수재를 제작할 경우, 필요한 벤토나이트의 양은 토취장의 토사와 사용된 벤토나이트의 종류에 따라 다르기 때문에 배합시험 및 투수시험을 수행하여 벤토나이트 함량을 결정하여야 한다(한국건설기술연구원, 1998).

본 시험에서 사용한 시료는 표준사와 나트륨계 벤토나이트를 혼합하여 혼합토 시료를 제작하였다. Table 1은 표준사, 벤토나이트, 벤토나이트 혼합토에 대한 각각의 물성치 결과를 도시하였다. 두 시료에 대한 최대 입경으로 보면 점토와 실트의 함량이 절대적으로 작은 벤토나이트가 표준사보다 약 11배 정도 작다. 이는 벤토나이트가 표준사보다 수분을 함유할 수 있는 비표면적이 큰 것을 의미한다.

이 혼합토의 혼합비는 건조중량비를 기준으로 표준사와 벤토나이트를 85대15, 80대20으로 혼합하여 제작하였다. 그리고 표준사 및 벤토나이트의 입도분포곡선과 혼합토의 압밀곡선을 Fig. 1에 도시하였다. 각 시험법은 한국공업규격에 의거해 압밀시험(KS F 2316), 체분석시험(KS F 2309) 및 비중시험(KS F 2308)법에 의거하여 실시하였다.

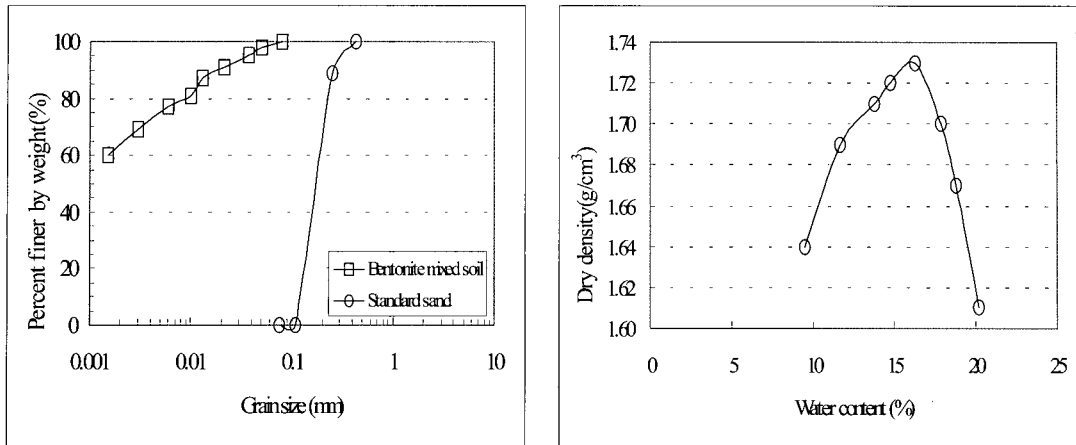
실험장치 및 방법

본 시험에 사용한 아크릴칼럼은 내경 5cm, 높이 3cm, 아크릴 두께 0.5cm의 원통형 아크릴칼럼을 제작한 후 12개의 아크릴칼럼을 연결시켜 높이가 36cm가 되도록 설치하였다. 이들 아크릴칼럼 사이는 O자형(o-ring) 고무링과 실리콘 컴파운드(silicon compound)로 물이나 공기가 아크릴칼럼 연결부위 사이로 유입/유출이 발생되지 않도록 하였으며, 이들의 결합은 볼트와 너트를 사용해 밀착 고정시켰다.

특히 아크릴칼럼 하단부는 물이 침투할 수 있도록

Table 1. Physical properties of the standard sand and bentonite.

Sample	Standard sand	Bentonite	Soil-bentonite mixture
Specific gravity(g/cm ³)	2.65	2.75	2.66
Grain size (%)	Coarse	92.0	0.0
	Silt	8.0	29.0
	Clay	0.0	71.0
Max. grain size(mm)	0.84	0.074	-



(a) Particle-size distribution curves

(b) Compaction curve

Fig. 1. Grain distribution curves for the standard sand and bentonite, and compaction curve of the soil-bentonite mixture (Standard sand : Bentonite = 85 : 15 by weight).

Table 2. Initial condition for the three soil-bentonite mixture columns.

	Column A	Column B	Column C
Initial volumetric water content (cc/cc)	0.0	0.0	15.0
Soil-bentonite mixture (standard sand : bentonite, by weight)	85 : 15	80 : 20	85 : 15
Initial dry density (g/cm³)	1.75	1.76	1.75
Initial void ratio	0.51	0.51	0.52

아크릴 유공판을 설치하여 자유수 공급탱크(water supply tank)로 공급되는 자유수와 항상 접촉할 수 있도록 하였다. 이 자유수의 수면은 아크릴칼럼 하단부와 동일한 수위가 될 수 있도록 설치하였다. 제작한 벤토나이트 혼합토 시료는 벤토나이트 혼합비와 체적함수비에 따라 총 3개의 아크릴칼럼으로 구성되어 있으며(Table 2), 이들 측면에 설치된 자유수 공급탱크는 자유수가 일정하게 공급될 수 있도록 수위를 일정하게 유지하는 기능을 수행한다. Fig. 2는 벤토나이트 혼합토 아크릴칼럼 연결침윤시험 설치 모식도이다.

각기 다른 제작 조건을 갖는 세 종류의 혼합토 칼럼은 Table 2에 기술한 초기 조건에 따라 시료를 압밀 제작하였으며, 시험기간은 2001년 11월부터 2003년 10월 까지 2년간 수행되었다. 장기간의 본 시험은 시험장치와 시료 칼럼을 실내온도가 20°C로 일정한 항온실에

별도로 설치 운영하였으며, 실내 공기 중으로 자유수의 증발을 방지하기 위하여 파라핀 용액(paraffin solution)을 0.5cm 정도의 두께가 되도록 넣었다. 이것이 자유수 수위에 부상되어 있으면서 파라핀 막을 형성시켜 증발을 방지할 수 있도록 고안하였다. 2년이 경과된 시점에서 벤토나이트 혼합토 칼럼을 각각의 칼럼 별로 분리하고 시료를 일정 높이(2.0~3.0cm 정도)로 절단한 후, 105°C 온도로 24시간 건조시험을 실시하여 건조중량 및 체적함수비를 함께 측정하였다. 특히 칼럼 하단부가 자유수 수위와 맞닿아 있기 때문에 일부 칼럼 하단부에서는 다량의 물이 존재해 있어 이들의 손실을 방지하기 위해 냉각질소로 냉각한 후 시료를 채취하였다. 또한 각 칼럼 시료에 대한 간극의 변화를 평가하기 위하여 체적함수비의 증가에 따른 간극비를 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

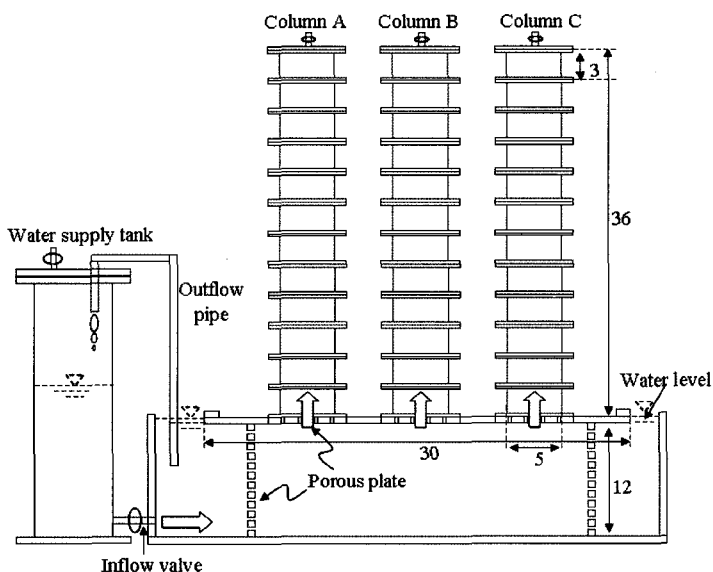


Fig. 2. Schematic diagram of the vertical permeation experiment [unit: cm].

$$\theta = \frac{(W - W_s) / \rho_w}{V} \quad (1)$$

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V}{V_s} - 1 \quad (2)$$

$$= \frac{V}{W_s} G_s \rho_w - 1 = \frac{Ah}{Ws} G_s \rho_w - 1$$

여기서 θ 와 e 는 체적함수비와 간극비를 의미한다. W , W_s , ρ_w , G_s 는 각각 공시체 습윤중량(g), 공시체 건조중량(g), 물의 단위체적중량(g/cm³)과 혼합토의 비중을 나타낸다. 간극비에서는 총체적(V) 내에 간극 체적(V_v)과 시료 체적(V_s)의 관계이므로 이는 공시체의 건조중량(W_s)에 대해 공시체 단면적(A), 절개한 혼합토 시료의 높이(h) 등과의 관계로부터 계산되었다. 최종적으로 혼합토 칼럼에 대한 체적함수비와 간극비의 계산 결과로부터 총 칼럼 높이에 따른 각각의 변화를 파악하였다.

벤토나이트 혼합토 함수비시험

유전율 측정장비

벤토나이트 혼합토의 유전율 측정은 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 측정장비를 사용하여 시료가 갖는 체적함수비와 이와 반응하는 유전율상수 변화를 측정하였다. 이 측정장비는 주파수 범위가 0.1~1.7GHz 상에서 전자기파의 인피던스 반응에 따라 매질의 유전율을 측정하는 것으로써, 전자기파 발생기(Tracking Generator), 스펙트럼 분석기(Spectrum Analyzer), 방향성 결합기(CM Directional Coupler), FDR 측정프로브 및 자료 수집기(Data Logger)로 구성되어 있다(김만일 등, 2004). 매질의 유전율 측정은 FDR 측정프로브를 측정 대상매질에 삽입한 후, 전자기파 발생기에서 고주파의 전자기파를 측정매질로 방출한다. 전자기파의 진행속도는 매질 주변의 유전율 특성에 따라 변하기 때문에 매질에 설치된 FDR 측정 프로브에서의 입사파와 측정프로브 선단부에서 반사파를 발생시킨다. 이 두 파는 합성간섭파를 발생시켜 방향성 결합기를 경유해 스펙트럼 분석기에서 관찰된다. 여기서 FDR 측정프로브 선단부에서의 반사파 신호는 FDR 측정프로브를 왕복하여 전송되기 때문에 위상차에 따라 늦어져 측정된 두 파의 합성간섭파는 일정한 주파수 간격에서 사인곡선(sin curve)과 비슷한

굴곡형태의 주파수 파장을 보이게 된다. 이러한 주파수 영역에서의 파장을 이용해 매질의 유전율상수가 결정된다.

시료 및 물성치

본 연구에서는 벤토나이트 혼합토에 대한 벤토나이트 혼합비의 측정한계를 측정하기 위하여 나트륨계 벤토나이트를 사용해 화강풍화토(5mm 체를 통과한 시료)를 혼합시켜 벤토나이트 혼합토 시료를 제작하였다. 제작된 벤토나이트 혼합토의 혼합비는 10%, 13%, 15%, 20%로 건조상태에서 교반시킨 후, 함수비 10%

Table 3. Physical properties of the soil-bentonite mixtures.

Material	Soil-bentonite mixture
Dry density, ρ_d (g/cm ³)	1.70
Porosity, n	0.38
Water content, ω (%)	10.0
Optimal water content, ω_{opt} (%)	14.0
Max. dry density, ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.75
Specific gravity, G_s	2.73

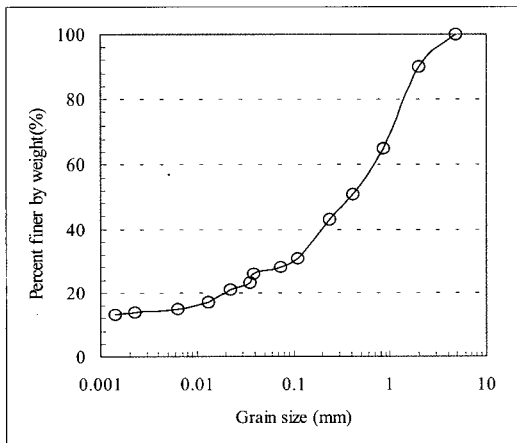
가 되도록 물을 첨가시켜 혼합하였다. 이렇게 제작된 혼합토 시료는 높이 20cm, 직경 6cm의 아크릴 시료에 일정하게 압밀시켜 제작한 후 실내시험을 수행하였다. 벤토나이트 혼합토 시료제작시 기본 물성치 조건을 Table 3에 나타내었다.

폐기물 매립장에서의 측정을 목적으로 벤토나이트 혼합토에 대한 유전율 반응 교정작업을 수행하였다. 공시체는 길이 20cm, 직경 6cm의 벤토나이트 혼합토 시료로 제작하였다. 벤토나이트 혼합토는 나트륨계 벤토나이트와 화강풍화토에 대해 배합율이 13%로 조절하여 불포화 시료를 제작하였다. 최대건조밀도 $\rho_d = 1.75 \text{ g/cm}^3$, 공극률 0.38로 하여 압밀 제작하였다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위하여 입도분석 및 압밀시험을 수행한 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

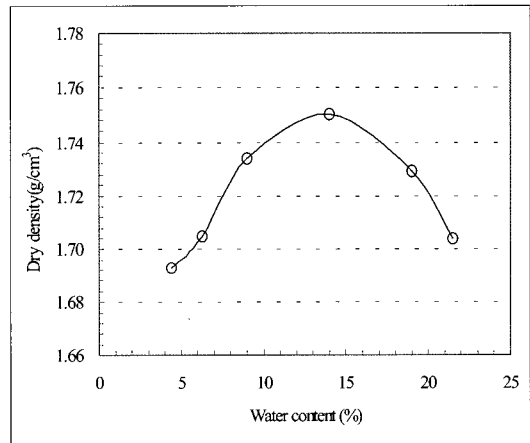
시험결과 및 토의

체적함수비의 분포

벤토나이트 혼합토 칼럼 A, B, C의 체적함수비와 칼럼 높이의 관계를 Fig. 4와 5에 도시하였다. 이들 결과로부터 칼럼 A, B, C의 높이가 0~8cm 범위에서는 각각 거의 일정한 체적함수비 증가 범위를 가지는 것으로 측정되었지만, 체적함수비가 각 칼럼에 대해 약간의 차이를 보이는 것은 Fig. 5에서 측정된 것과 같이 초기 간극비 차이에 기인되는 것으로 사료된다. 이것은



(a) Particle-size distribution curve



(b) Compaction curve

Fig. 3. Physical properties of the soil-bentonite mixture.

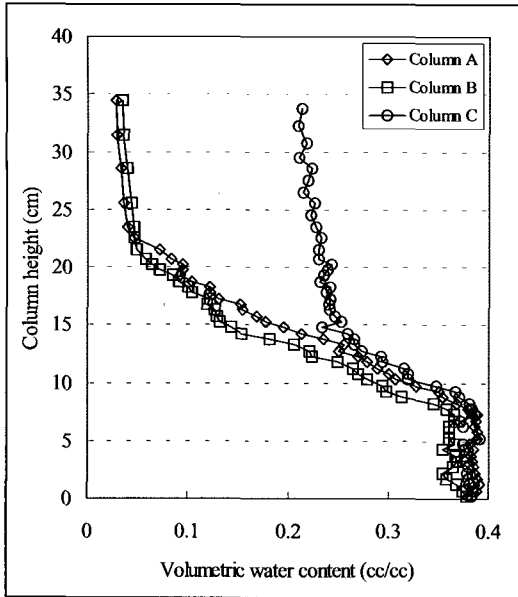


Fig. 4. Measured values of column samples from vertical experiment.

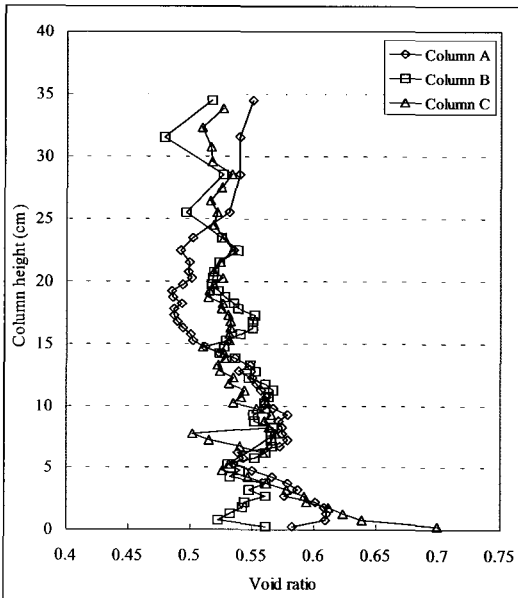


Fig. 5. Response of void ratio to column height from vertical experiment.

칼럼 하단부에서 침투된 자유수가 모세관 현상으로 인해 시료의 간극 내로 거의 완전히 침투된 것으로 판단된다. 칼럼 A와 B에서는 높이 20cm를 기준으로 하여 자유수의 침윤현상이 급격히 감소하는 경향을 보이며 칼럼 C는 높이 15cm 부근에서 명확하게 체적함수비의 변화를 파악할 수 있다. 이러한 현상은 초기 각 칼럼을 제작할 때 체적함수비의 함양 여부에 따른 것으로서 칼럼 A와 B는 체적함수비가 0%, 칼럼 C는 15%의 체적함수비로 제작되었기 때문이다.

특히 칼럼 A와 B에서는 초기 체적함수비와 비교해 볼 때 약 10% 정도, 칼럼 C는 약 58% 가량 증가한 것으로 측정되었다. 이러한 원인은 시료가 가지고 있는 모세관 현상에 기인한 것으로 판단된다. 침윤시험이 종료된 시점에서 칼럼에 대해 일정 높이로 잘라 각 시료를 건조시험을 실시하여 간극비를 계산해 본 결과, 상단부보다는 하단부에서 간극비가 서서히 증가하는 것으로 나타났으며, 이것은 칼럼 제작시 시료의 압밀에 의한 영향 내지 하단부로부터 자유수의 침투로 인해 بنت오나이트 매질이 물을 함유하면서 팽창 현상에 의해 시료의 간극비 변화가 일어난 것으로 생각된다.

칼럼 높이에 따른 체적함수비-간극비 관계

벤토나이트 혼합토의 침투 특성을 정량적으로 파악하는 것은 매우 중요하지만 우선적으로 시료의 변형을 고려해야 한다. 본 시험에서는 제작된 혼합토 칼럼 내 높이에 따라 간극비가 다르기 때문에 이들의 간극비에 대해서 개별로 평가하는 것이 중요하다. 이 간극비는 연직침윤시험이 종료된 후 설정된 높이에 따라 시료를 채취한 후 건조시험을 통해 체적함수비와 간극비를 함께 산정하였다. 칼럼 A와 B를 비교해 보면, 초기 간극비는 거의 비슷한 경향을 보이고 있으나 칼럼 B 쪽이 동일한 체적함수비 범위에서 간극비가 크게 나타났고, 벤토나이트 혼합비 20% 쪽이 15%와 비교해 크게 침윤한 것을 파악할 수 있다. 또한 칼럼 20cm 부근에서 간극비가 작게 나타나는 것은 칼럼 하부의 침윤에 의해 이 부분이 좀 더 압밀 현상이 발생했기 때문인 것으로 사료된다.

체적함수비-유전율 관계

불포화 시료 제작시 압밀하중을 동일하게 가하여 제작한 벤토나이트 혼합토 시료에 체적함수비를 각기

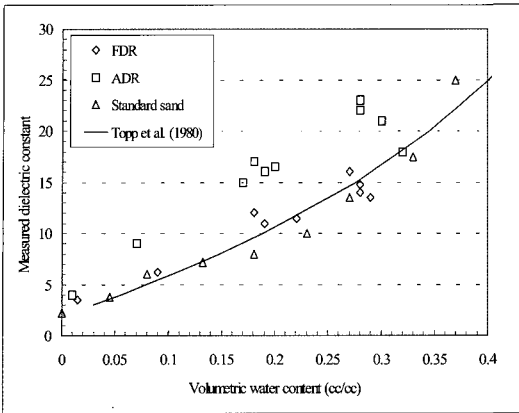


Fig. 6. Responses of dielectric constant for the soil-bentonite mixtures.

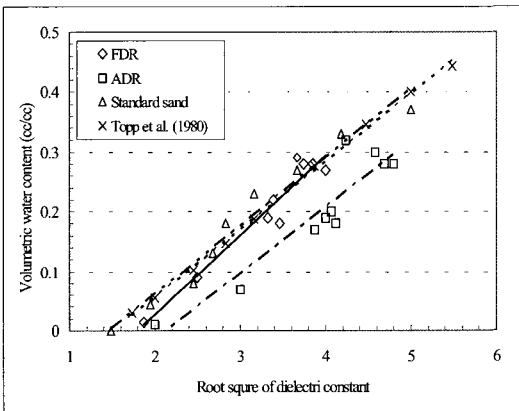


Fig. 7. Corrected results for the soil-bentonite mixtures using the dielectric systems.

조절하여 제작한 후(Table 2), 유전을 측정장치인 FDR과 ADR 측정프로브를 삽입 설치하여 유전을 변화를 검토하였다. 또한 표준사에 대해 체적함수비 관계만을 FDR로 측정하였다. 이러한 측정결과를 Topp et al. (1980)가 제시한 경험식을 이용하여 함께 비교한 것을 Fig. 6에 도시하였다. 측정결과에서 ADR 측정치가 FDR 측정치 보다 높게 나타나고 있는데, 이는 ADR 측정프로브가 3분식의 원통형으로 측정 대상 지점에 설치시, 프로브가 설치되어 있는 혼합토 일부분에서 압밀 현상이 발생함에 따라 측정 유전을 측정치 변화가 발생된 것으로 판단된다.

체적함수비(θ)와 유전율상수의 평방근($\sqrt{\epsilon}$)의 관계를 Fig. 7과 같이 도시한 후, 각각의 측정장비에 대한 결과를 1차원 방정식으로 유도하였다(Table 4). 유도된 1차원 방정식의 각 상관계수를 고려해 보면, FDR 측정프로브로 측정된 벤토나이트 혼합토와 표준사에 대해서는 비교적 유사한 값을 보이고 있지만, ADR 측정프로브로 측정된 벤토나이트 혼합토는 다소 작은 값을 보이고 있다. 이러한 원인은 앞서 설명한 바와 같이 측정프로브의 형태 및 설치상의 문제로 인해 나타난 결과로 생각되며, ADR보다는 1선식 FDR 측정프로브의 적용 효율성이 높은 것으로 판단된다. 결과적으로 교정결과에서 FDR 측정치가 Topp 등의 경험식 결과와 유사하게 나타남에 따라 벤토나이트 혼합토에 대한 체적함수비의 측정이 유전율 반응을 이용해 가능할 것으로 사료된다. 현장에서 FDR 및 ADR 측정장비 계측은 지반의 평균적인 수분량을 측정하기 위한 것으로서, 다수의 측정지점에 대한 측정이 가능하며, 이에 부합되는 측정장비로는 20개의 측정프로브를 동시에 운영할 수 있는 FDR 측정법이 유효할 것으로 사료된다.

Table 4. Corrected formula for the each dielectric system.

System	Material	Linear formula	Correlation coefficient (R^2)
FDR*	Soil-bentonite mixture	$\theta = 0.1331\sqrt{\epsilon} - 0.2389$	0.936
ADR**	Soil-bentonite mixture	$\theta = 0.1103\sqrt{\epsilon} - 0.2342$	0.864
FDR*	Standard sand	$\theta = 0.1145\sqrt{\epsilon} - 0.1667$	0.962
TDR***	Empirical formula by Topp et al. (1980)	$\theta = 0.1137\sqrt{\epsilon} - 0.1705$	0.999

* Frequency Domain Reflectometry (FDR) system ** Amplitude Domain Reflectometry (ADR) system

*** Time Domain Reflectometry (TDR) system

결 언

매립장 차수재의 경우, 매립물질에서 발생하는 침출수의 침투 거동 및 주변지역의 지하수 거동에 따른 지하수 수위 변화 등의 영향에 의해 차수재의 성능에 문제를 일으킬 가능성이 항상 내재되어 있으므로 이들에 대한 변화 및 효율적인 모니터링 기법 등이 요구된다. 본 연구는 폐기물 처분장 등에서 차수재료로 사용되는 벤토나이트 혼합토에 대한 체적함수비 변화 등을 파악하기 위해 장기간에 걸친 연직침윤시험과 체적함수비와 유전율 반응을 이용해 물성치를 파악할 수 있는 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 측정 장비(측정 주파수범위 0.1~1.7GHz)를 적용해 실내시험을 수행하였다.

연직침윤시험에서는 벤토나이트 혼합비(칼럼 A와 C:15%, 칼럼 B:20%)에 대한 체적함수비의 변화 양상 보다는 초기 벤토나이트 혼합토 시료를 제작할 때 적용한 초기 체적함수비(칼럼 A와 B : 0%, 칼럼 C:15%) 영향에 의해 시료 내에서 수분 침윤이동을 지배하는 것으로 나타났다. 이것은 시료 내에서 칼럼 하부에 존재하는 자유수를 끌어당기는 모세관력이 강하게 작용한 것으로 최대 체적함수비의 영향 범위는 칼럼 높이 0에서 8cm 부근에서 최대 변화를 보이고 있다. 물론 이 모세관력의 영향은 칼럼 상부에서도 체적함수비의 영향을 보이고 있지만, 초기 체적함수비를 다량 함유하고 있는 쪽이 모세관력이 훨씬 강하게 작용함을 알 수 있다. 또한 벤토나이트와 화강풍화토를 섞어 제작한 벤토나이트 혼합토에 대한 유전율상수 변화로부터 불포화 시료 내 수분함량을 측정된 결과, 각 시료의 체적함수비 함양 증가에 따라 측정된 유전율상수가 증가하는 것을 확인하였다. 즉 이러한 것은 결과적으로 동일한 조건을 갖는 불포화 시료 내에서 미량의 수분함량 변화만으로도 유전율상수 변화를 감지할 수 있기 때문에, 침출수와 같은 액체상태의 물질 등의 침투거동을 측정프로브가 설치된 취약지점에서 장기적인 침투거동 형태를 충분히 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해준 사업단 측에 감사드린다.

참고문헌

- 김만일, 정교철, 박창근, 2004, 지하댐 지반 물성치 측정을 위한 유전율 측정 시스템 개발, 지질공학, 14(4), 361-369.
- 김영수, 김대만, 최철용, 이형철, 2001, 화강풍화토-Bentonite 혼합토의 거동특성에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 발표논문, 1-4.
- 류권, 채교익, 2000, Rowcell 실험에 의한 점토-벤토나이트 차수재의 투수계수의 측정, 대한토목학회 학술발표회 발표논문, 277-280.
- 장연수, 이광열, 2001, 지반환경공학, 구미서관, 587 p.
- 이광열, 2001, Soil-Bentonite 혼합토의 다짐 및 투수성 연구, 대한토목학회 논문집, 21(6-C), 689-696.
- 한국건설기술연구원, 1998, 폐기물 매립시설의 설계·시공 기술에 관한 연구, 건기연 98-075, 329 p.
- 한국지반공학회, 2004, 지반공학 시리즈 13 - 폐기물 매립 및 토양환경, 사단법인 한국지반공학회, 구미서관, 313 p.
- Gleason, M. H., Daniel, D. E., and Eykholt, G. R., 1997, Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123(5), 438-445.
- Knitter, C. C., Haskell, K. G., and Peterson, M. L., 1993, Use of low plasticity silt for soil liners covers, Proceedings of the 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis Prakash, Ed., 1255-1259.
- Mitchell, J. K., Bary, J. D., and Mitchell, R. A., 1995, Material interactions in solid waste landfills, Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication No. 46, ASEC, P. 568-590.
- Giani, G. P., 1992, Rock slope stability analysis, A. A. Balkema, 374 p.
- Tay, Y. Y., Stewart, D. I. and Cousens, T. W., 2001, Shrinkage and desiccation cracking in bentonite-sand landfill liners, Engineering Geology, 60, 263-274.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan, 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, Water Resour. Res., 16(3), 574-582.

투 고 일 2005년 4월 11일
심 사 일 2005년 4월 12일
심사완료일 2005년 6월 15일

김만일
한국수자원공사 수자원연구원 지하수지반연구소
대전광역시 유성구 전민동 462-1
Tel: 042-860-0427
Fax: 042-890-0592
E-mail: mikim916@paran.com