

흙-벤토나이트 혼합 차수재의 품질관리 사례연구

A Case Study on the Quality Control of Soil-Bentonite Admixed Liner

정하익¹⁾, Ha-Ik Chung, 이용수²⁾, Yong-Soo Lee, 홍승서²⁾, Seung-Seo Hong, 정길수²⁾, Gil-Soo Chung, 이회준³⁾, Hoi-Jun, Lee

- 1) 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. Dept., KICT
- 2) 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT
- 3) 환경관리공단 기술진흥처 과장, Section Chief, Environmental Management Corporation

SYNOPSIS : This study presents the physical and engineering characteristics of soil-bentonite admixed liner in E landfill. Main focus was the hydraulic conductivity of compacted soil-bentonite admixed and mechanisms governing low permeable properties of the admixed liner. Laboratory and field tests such as compaction, hydraulic conductivity, density, water content for the soil-bentonite admixed liner were carried out. Quality control criteria for the best construction of the soil-bentonite admixed liner was suggested through laboratory and field test results.

KEY WORDS : soil-bentonite admixed liner, hydraulic conductivity, quality control, landfill, compaction

1.서론

폐기물 관리법에 의하면 폐기물 매립시설의 차수재료로 투수계수가 1.0×10^{-7} cm/sec 이하가 되는 점토 또는 벤토나이트 등과 같은 점토류를 사용하도록 규정하고 있다. 법에서 정한 투수계수를 만족하는 점토의 확보는 경제적 또는 지역적 조건으로 인하여 구입하기가 어려운 실정으로, 양질의 점토 차수재료와 동등한 차수효과를 지닌 차수재료의 사용이 불가피하다. 점토와 동등한 차수재료는 여러 가지가 있으나 이 중에서 흙-벤토나이트 차수재는 현장토를 이용하는 특징을 지니고 있다.

Maden의 1인(1994)은 일반적으로 체적 팽창율과 비표면 면적이 큰 벤토나이트를 사용하는 방법을 제시하였고, Sharma와 Kozicki(1988)는 소정의 투수계수를 만족하는 흙-벤토나이트 혼합비는 흙의 종류 및 토질특성에 따라 큰 범위를 가진다고 하였으며, Knitter와 2인(1993)은 벤토나이트의 혼합비에 따라 강도, 투수특성, 다짐특성 등의 토질 역학적인 특성에서 큰 변화가 있다고 하였다. 그러므로 흙-벤토나이트 혼합 차수재를 폐기물 매립시설의 차수재료로 사용할 경우, 최적의 혼합비는 여러 가지 실험을 실시하여 결정하여야 한다.

본 논문은 흙-벤토나이트 혼합 차수재의 현장 품질관리 방안을 제시하는데 있다. 이를 위하여 일련의 실내 및 현장 실험을 수행하였다. 실내 실험은 소정의 투수계수를 만족하여 최적의 혼합비를 결정하는 실내 투수시험을 실시하였고, 장기적으로 침출수에 따른 흙-벤토나이트 혼합 차수재의 투수 변화를 살펴보고 있다. 현장에서는 실내 실험에서 정한 혼합비에 따른 흙-벤토나이트 혼합 차수재 설치 중 또는 설치 후 소정의 투수성을 유지하는지에 대한 품질실험을 실시하였다.

2. 혼합비 선정을 위한 실내시험

2.1 기본특성

실험에 사용된 재료는 화강풍화토와 벤토나이트로, 화강풍화토는 충청남도 E 매립시설의 인근에서 채취한 화강토를 사용하였다. 실내시험을 위한 화강토의 시료는 24시간 노건조시킨 후, 4번체 통과 시료를 사용하였다. 벤토나이트는 화강풍화토의 투수계수가 1.0×10^{-7} cm/sec보다 크므로, 소정의 투수계수이하를 만족시키기 위해 사용하였다.

표 1은 화강풍화토와 벤토나이트에 대한 기본물성시험의 결과를 나타내고 있다. 표에 의하면 화강풍화토는 비중이 2.7이고 200번체 통과량이 0.7%로 나타났다. 액소성시험결과, 화강풍화토는 비소성적(NP) 성질을 가지고 있고, 입도분석 결과, 입도분포가 양호한 SW로 분류된다. 또한 벤토나이트는 비중이 2.25, 200번체 통과량은 97.3%이다. 소성지수(PI)는 221%로 일반적인 토사에 비해 상당히 크게 나타났고 팽윤도는 22mg/2g으로 나타났다. 또한 벤토나이트의 몬트모릴로나이트 함량은 73%로 나타났다.

표 1. 화강풍화토, 벤토나이트의 기본물성

시 험 항 목	시험결과		
	시험내용	화강풍화토	벤토나이트
비 중 시 험	비 중 (G_s)	2.7	2.25
현장 함수비 시험	자연함수비(%)	15.4	2.7
액·소성 시험	액성한계(LL, %)	-	295
	소성한계(PL, %)	NP	74
	소 성 지 수(PI)	-	221
입 도 시 험	유효입경(D_{10} , mm)	0.25	-
	D_{30} (mm)	0.6	-
	D_{60} (mm)	1.55	-
	균등계수, C_u	6	-
	곡률계수, C_g	1	-
	통 일 분 류	SW	CH
	#200번체 통과량(%)	0.7	97.3
팽윤도 시험	팽 윤 도 (mg/2g)	-	22
Methylene Blue 시험	몬트모릴로나이트 함량(%)	-	73

2.2 다짐특성

혼합토의 벤토나이트 혼합비는 중량비에 따라 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%로 하여 KSF 2312의 D 다짐을 실시하였다. 그림 1은 흙-벤토나이트의 혼합비율에 대한 최대건조단위중량의 결과를 나타내고 있다. 벤토나이트 혼합비가 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하고 있으며 이것은 벤토나이트가 화강풍화토의 단위중량보다 작기 때문인 것으로 판단된다. 그림 2는 벤토나이트 혼합비에 따른 최적함수비의 관계를 나타내었다. 그림에 의하면 최적함수비(OMC)는 벤토나이트 혼합비의 증가에 비례하는 경향을 보이고 있다.

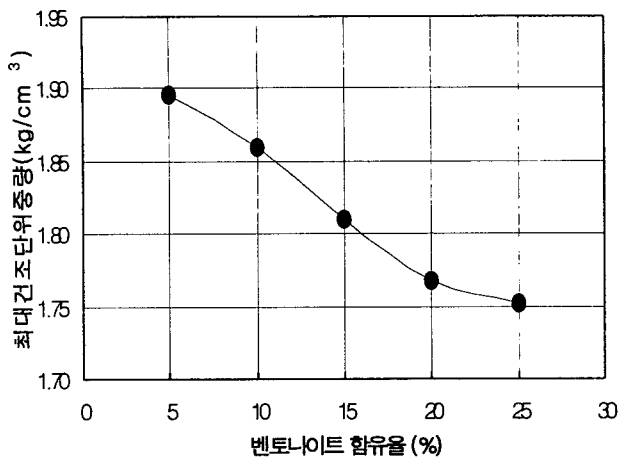


그림 1. 혼합비에 대한 최대건조단위중량

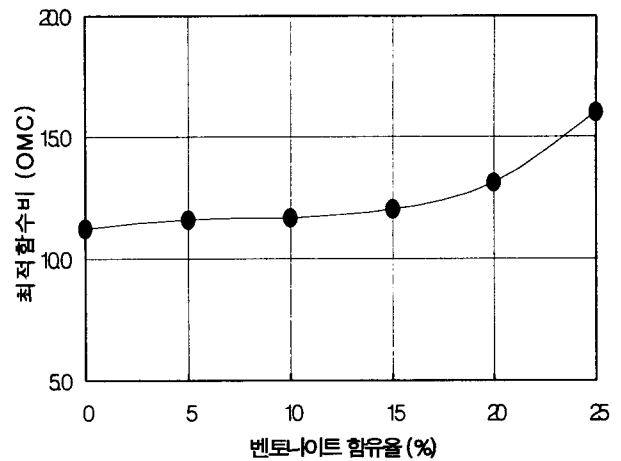


그림 2. 혼합비에 대한 최적함수비

2.3 물에 대한 투수특성

미국의 환경청(US EPA)에서는 차수층의 다짐기준을 최대건조밀도의 90%이상으로 하고 함수비는 최적함수비의 2~4%범위에서 시공할 것을 권장하고 있다. 위와 같은 내용을 바탕으로 실내투수시험에 사용한 시료제작은 다짐시험을 통해 획득한 최대건조밀도의 90%, 95%의 다짐조건과 최적함수비의 습윤층 조건으로 제작하였다. 최대건조밀도의 95% 다짐의 경우에는 벤토나이트 혼합비를 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%로 혼합하였고, 최대건조밀도의 90% 다짐인 경우 벤토나이트 혼합비를 0%, 15%, 25%의 조건으로 하여 변수위 투수시험을 실시하였다. 투수시험 결과는 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 모든 시료에 대한 투수시험은 시간이 경과함에 따라 투수계수가 점진적으로 감소하였고 비교적 안정된 값을 유지하였다. 그림 3에 의하면 90% 다짐조건에 대한 투수시험 결과를 살펴보면, 투수계수가 $1.39 \times 10^{-6} \sim 1.11 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 나타났고 벤토나이트 혼합비가 15%이상에서, 95% 다짐조건인 그림 4에서 투수계수의 범위가 $1.77 \times 10^{-6} \sim 1.18 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 이고 혼합비가 10%에서 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하로 나타났다. 벤토나이트의 혼합비가 증가함에 따라 혼합차수층의 투수계수는 지수함수관계로 감소하며 일정값의 혼합비를 지나서는 벤토나이트의 혼합비를 증가시키더라도 투수성의 감소에는 큰 효과가 없는 것으로 나타났다.

표 2. 투수시험결과

혼합비 (%)	다짐도(95%)					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
투수계수 (cm/sec)	1.77×10^{-6}	3.00×10^{-7}	1.41×10^{-7}	7.33×10^{-8}	4.31×10^{-8}	1.18×10^{-8}

혼합비 (%)	다짐도(90%)		
	5%	15%	25%
투수계수 (cm/sec)	1.39×10^{-6}	1.13×10^{-7}	1.11×10^{-8}

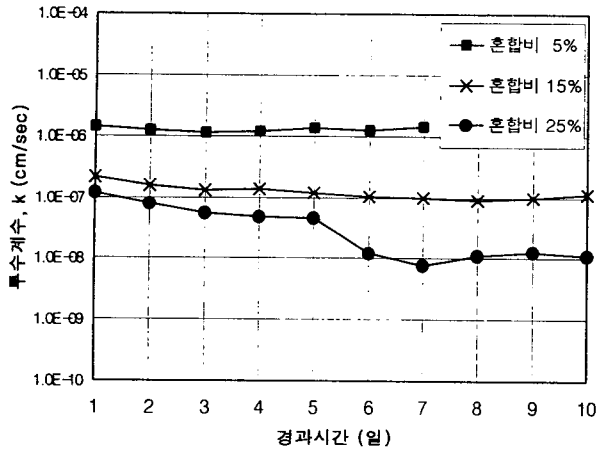


그림 3. 실내 투수시험 결과(90%)

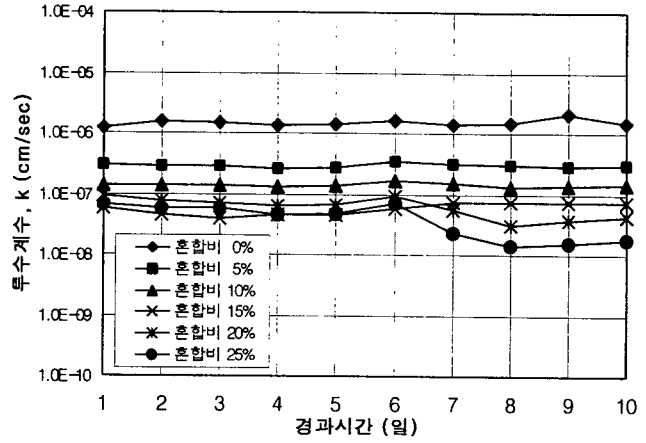


그림 4. 실내 투수시험 결과(95%)

2.4 침출수에 대한 투수특성

매립장에서 발생하는 침출수를 사용하여 흙-벤토나이트 혼합차수재의 투수특성을 살펴보았다. 침출수는 김포쓰레기 매립장에서 발생된 침출수를 사용하였고, 시험에 사용한 침출수의 조제는 5일간 방치시켜 잔존물질이 충분히 침전되도록 한 후, 윗 부분의 침출수를 채취하여 잔존물질로 인한 투수계수의 저하를 최대한 방지하였다. 표 3은 침출수에 의한 투수계수 변화로 90% 다짐조건에서의 투수계수는 $8.04 \times 10^{-7} \sim 1.69 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 로 나타났고 혼합비가 10%이후에서 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하로 나타났다. 다짐도 95%에서는 전체적으로 투수계수의 범위가 $9.25 \times 10^{-7} \sim 1.61 \times 10^{-9} \text{cm/sec}$ 로 나타났으며, 혼합비 10%에서 소정의 투수계수에 만족하였다.

표 3. 침출수에 의한 투수시험결과

혼합비 (%)	다짐도(95%)					
	0%	5%	10%	15%	20%	25%
투수계수 (cm/sec)	9.25×10^{-7}	2.18×10^{-7}	7.68×10^{-8}	2.48×10^{-8}	5.96×10^{-9}	1.61×10^{-9}

혼합비 (%)	다짐도(90%)		
	5%	15%	25%
투수계수 (cm/sec)	8.04×10^{-7}	5.33×10^{-8}	1.69×10^{-9}

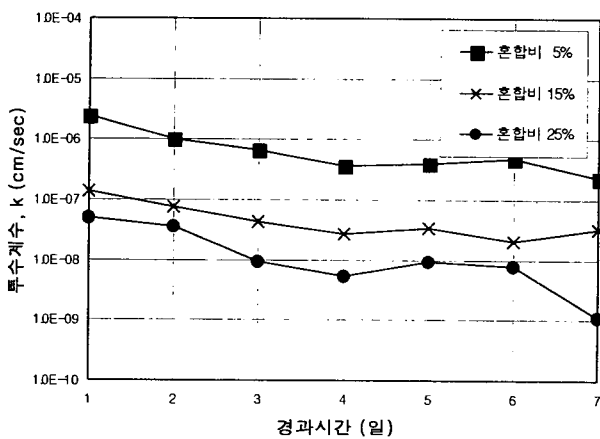


그림 5. 침출수 투수시험 결과(90%)

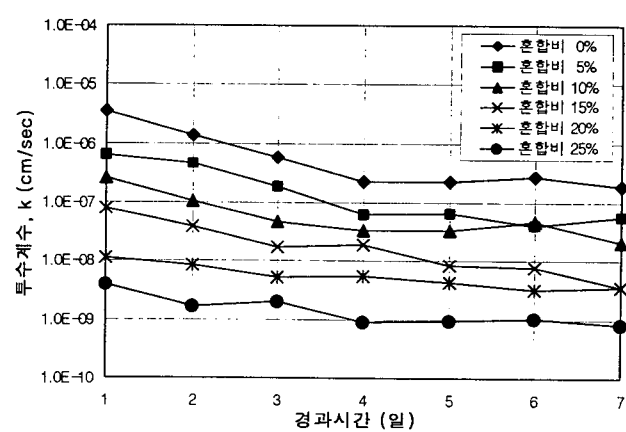


그림 6. 침출수 투수시험 결과(95%)

3. 시공품질관리를 위한 현장시험

3.1 시험조건

현장시험은 시험시공구간과 본시공구간으로 나누어 실시하였는데 시험시공구간에는 불교란 시료를 채취하여 실내투수시험을 실시하였고 본시공구간에서 흙-벤토나이트 혼합차수층의 투수계수를 직접 확인하기 위하여 현장투수시험을 수행하였다. 또한 현장투수시험의 결과값을 비교하기 위하여 현장에서 불교란 시료를 채취하여 실내시험을 실시하여 두 시험에 대한 비교/검토하였다.

현장투수시험은 PVC 파이프를 이용한 투수시험과 시험장비를 이용한 투수시험의 2가지 방법을 실시하였다. PVC 파이프를 이용한 현장시험(Packer Test)은 그림 7과 같이 차수층 표면을 굴착하고 PVC 파이프를 삽입하여 시험기 유리관내의 수위변화를 측정하여 투수계수를 구하는 방법이다. 시험장비에 의한 현장투수시험은 그림 8과 같이 Soil Moisture Corp.(Model 2800, 미국)에서 제작한 Guelph Permeameter를 이용하여 투수계수를 측정하였다.

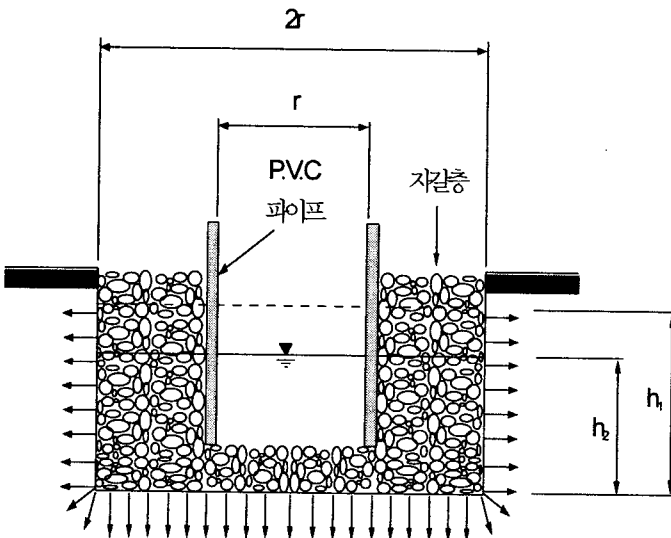


그림 7. PVC 파이프를 이용한 현장시험

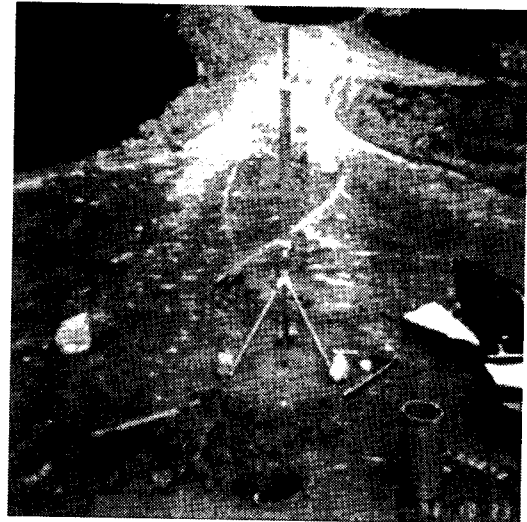


그림 8. Guelph Permeameter

3.2 시험시공구간

시험시공은 흙-벤토나이트 혼합차수층에 대한 실제시공 현장의 적용가능성을 판단하는 중간과정으로 시험구간을 조성하여 투수시험을 실시하였다. 시험시공구간의 조성은 실내시험을 통하여 제안된 벤토나이트 혼합비와 현장함수비를 각각 18%와 15%의 조건으로 하고 층두께는 30cm로 하였다. 다짐방식은 그림 9와 같이 먼저 양쪽 로울러(Sheep Foot Roller)로 1차 다짐을 실시하고 머캐덤 로울러(Macadam Roller)로 최종마무리를 하는 방법을 택하였다.

현장의 다짐도를 확인하기 위하여 현장들밀도 시험을 수행하였다(그림 10). 현장들밀도시험의 결과에 의하면 시험시공구간의 다짐도는 97.0%~98.5%의 범위를 나타냈다. 준비한 투수시험용 몰드를 이용하여 현장밀도시험 지점에서 불교란 시료를 채취하여 실내 투수시험을 실시하였으며 투수계수는 $3.63 \times 10^{-8} \sim 1.45 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 범위로 폐기물 관리법에서 정한 소정의 투수계수 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이상과 같은 시험시공 결과를 토대로 시험시공에서 실시된 벤토나이트 혼합비, 시공함수비, 다짐방법을 본시공에 적용하였다.



그림 9. 시험시공 장면



그림 10. 현장 다짐도 검사

표 4. 시험시공 결과

시험번호	현장 건조밀도 (kg/cm^3)	다짐도 (%)	함수비 (%)	투수계수 (cm/sec)
1	1.739	97.7	15.1	1.45×10^{-8}
2	1.754	98.5	14.8	3.63×10^{-8}
3	1.726	97.0	15.3	3.21×10^{-8}

3.3 본시공구간

시험시공을 통하여 본시공에 적용하려고자 하는 벤토나이트 혼합토의 혼합비, 시공함수비, 다짐방법 등이 확인되었다. 본시공은 벤토나이트 혼합층은 50cm의 두께로 계획되어 있으며, 하부에는 인근지역에서 채취한 점토질의 양질토를 포설 다짐하고 그 위에 벤토나이트 혼합층을 시공하였다. 벤토나이트 혼합토는 토취장에 혼합배치플랜트를 설치하여 플랜트 혼합을 실시하였다. 벤토나이트 혼합층의 시공은 25cm 두께의 2층으로 나누어 양쪽 로울러와 머캐덤 로울러를 이용하여 다짐작업을 실시하였다. 시험시공과 마찬가지로 현장시공을 위한 흙-벤토나이트 혼합비는 안전율을 고려하여 18%로 하였으며 현장의 함수비는 최적함수비의 2~4%를 더한 15%로 하였다. 현장다짐도는 미국 EPA가 권장하는 다짐도를 90% 이상으로 하였다.

현장 다짐도 및 투수시험 위치는 그림 11과 같이 차수층이 시공되는 매립지 바닥의 전면적에 고르게 분포하도록 배치하였다. 다짐작업에 의한 다짐도의 확인은 시험시공과 마찬가지로 현장들밀도시험을 실시하였다.

표 5를 보면 흙-벤토나이트 혼합차수층의 다짐도는 98.5~99.2%의 범위로 양호한 다짐상태를 보이고 있으며 현장 함수비는 15.1~15.3% 범위를 보이고 있다. 또한 현장에서 채취한 불교란 시료의 투수계수는 $3.63 \times 10^{-8} \sim 1.45 \times 10^{-8} \text{cm}/\text{sec}$ 의 범위로 나타났다. 표 6에서는 현장에서 실시한 투수시험 결과를 제시하였다. 현장시험에 의한 투수계수는 $9.55 \times 10^{-8} \sim 6.35 \times 10^{-8} \text{cm}/\text{sec}$ 의 범위에 있는 것으로 나타났다. 현장 투수시험에 의해 산정된 투수계수가 실내 변수위 투수시험 결과보다 전반적으로 약간 크게 나타났다. 현장에 시공된 벤토나이트 혼합층의 투수계수는 불교란 시료를 이용한 투수시험 및 현장투수시험 모두 차수재로서의 투수계수 기준인 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm}/\text{sec}$ 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

표 5. 본시공의 다짐도 및 현장함수비 시험결과

시험번호	현장건조밀도 (kg/cm ³)	다짐도 (%)	함수비 (%)	실내투수계수 (cm/sec)	비고
L-1	1.765	99.2	15.1	3.63×10^{-8}	1차 차수층
L-2	1.751	98.4	15.5	4.05×10^{-8}	1차 차수층
L-3	1.758	98.8	15.7	6.92×10^{-8}	2차 차수층
L-4	1.754	98.5	15.3	4.21×10^{-8}	2차 차수층

표 6. 본시공의 현장투수시험 결과

시험번호	투수계수 (cm/sec)	비고
F1	6.35×10^{-8}	Guelph Permeameter
F2	7.29×10^{-8}	Guelph Permeameter
F3	9.55×10^{-8}	Packer Test(h=30cm)
F4	9.39×10^{-8}	Packer Test(h=30cm)
F5	8.53×10^{-8}	Packer Test(h=20cm)
F6	7.97×10^{-8}	Packer Test(h=20cm)

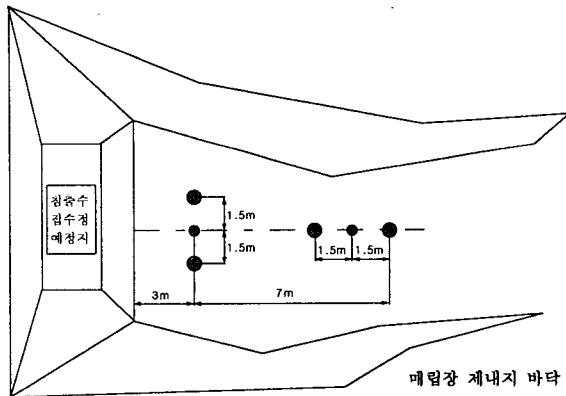


그림 11. 현장시험 위치도

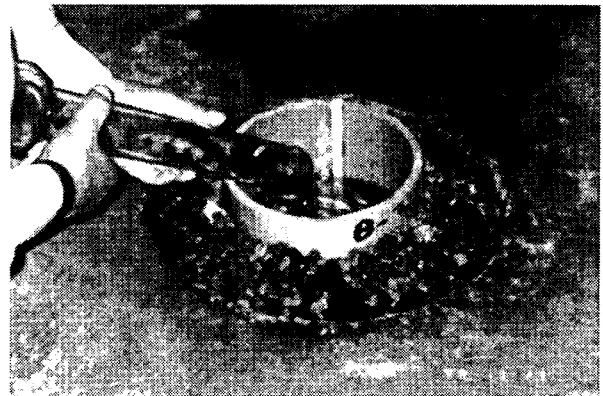


그림 3.8 PVC관에 의한 현장투수시험

4. 결론

이상과 같이 본 연구에서는 흙-벤토나이트 혼합차수재를 폐기물 매립장의 차수재로 사용하는 경우에 수행되는 실내 및 현장시험과 품질관리 방안에 대하여 살펴보았다. 그 결과를 요약/정리하면 다음과 같다.

1. 실내투수시험은 일반수를 투수시료에 통과한 경우와 침출수를 사용한 경우로 나누어 실시하였다. 일반수의 경우 다짐도 90%에서 벤토나이트 혼합비가 15%이후에서, 다짐도 95%는 벤토나이트 10%에서 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec이하로 나타났으며 침출수는 다짐도 90%와 95%에서 벤토나이트 혼합비가 10%이후에서 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec이하로 나타났다. 전체적으로 침출수 속에 있는 잔존물질로 인하여 일반수보다 투수계수가 작게 나타났다.

2. 실내시험결과를 토대로 소정의 투수계수 및 다짐도를 만족할 수 있는 적정의 벤토나이트 혼합비는 안전율을 고려하여 18%로 하였으며 현장밀도는 1.605g/cm^3 , 현장함수비 15%로 결정하였다.
3. 현장투수시험결과 투수계수는 $1.65 \times 10^{-8} \sim 9.55 \times 10^{-8}$ cm/sec의 범위로 나타났고, 다짐도는 98.4~99.2%의 범위로 소정의 기준을 만족하는 것으로 평가되었다.
4. 매립장에서의 벤토나이트 혼합차수재 시공과 관련하여 국내 매립장에서 점토 및 벤토나이트 혼합재를 매립장의 차수재로 사용하는 데에 있어 본 연구가 좋은 참고자료가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 건설교통부(1995), 폐기물 매립지 차수재 개발, 연구보고서, KICT/95-GE-1202, 한국건설기술연구원, 295p.
2. 정하익(1994), 오염지반 및 지하수의 정화기술, 한국건설기술연구원, 건설기술정보, 통권 133호, pp.22~26.
3. 한국건설기술연구원(1992), 도시폐기물 매립장의 건설부지 활용과 위생매립시스템에 관한 연구, 건기연 92-GE-112, 274p.
4. Acar, Y. B. and David, E. D.(1995), Geoenvironment 2000, Geotechnical special publication No. 46.
5. Chapuis, R. P. and M. Aubertin, First canadian conference on environmental geotechnics, The Canadian Geotechnical Society, pp.484.
6. David, E. Daniel(1991), "Geotechnical practice for waste disposal", Chapman & Hall, 683p., 1993.
7. Knitter, C. C., HasKell, K. G. and Peterson, M. L.(1993), " Use of Low Plasticity Silt for Soil Liners Cover" in Proceeding of the 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis Prakash, Ed., pp.1255~1259.
8. Richard D. Woods(1987), Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, Proceedings of a Specialty Conference sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers. Geotechnical Special Publication No. 13, ASTM, 863p.
9. Sharma, H. D., and Kozicki(1988), " The Use of Synthetic and/or Soil-Bentonite Liner for Groundwater Protection" , on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis Prakash, Ed., pp.1149~1156.