

폐기물매립장의 차수 및 복토재로서 페콘크리트 활용방안 연구 Reuse of waste concrete as a potential liner and cover materials in landfill

정학익, HA-1K JEONG¹, 이용수 YONG-SOO LEE², 심한인 HAN-IN SHIM², 우재윤 JE-YOON WOO³, 전이배 LEE-BAE JEON²

- *1:한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology, Seoul
- *2:한국건설기술연구원 지반연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology, Seoul
- *3:한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원, Researcher Fellow, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology, Seoul

개요(SYNOPSIS) : Geomembrane liners, clay, bentonite or cement admixtures and stabilized earth liners have been widely used for suitable liner and cover materials in waste containment. However, in many instances, such materials are extremely expensive because of high costs of synthetic liners or inadequate because of the lack of suitable clay materials at the disposal site. Waste concrete present a significant potential as cost-effective waste liner and cover materials. A series of tests was performed on these waste materials and stabilized admixtures to evaluate both the physical and mechanical characteristics and the chemical interactions with leachate. A summary of the finding of this investigation is presented. The laboratory experiments indicate that additives admixed waste concrete have many properties that are attractive in liner and cover materials for landfills.

1. 서론

과거에 축조되었던 공동주택, 업무용 건물, 교량 등이 이제는 노후화되어 현재 재개발 및 재건축이 성행하고 있다. 이와같이 노후화된 콘크리트 구조물을 해체함으로써 인하여 막대한 양의 폐콘크리트가 발생되고 있으며 이들은 대부분 단순매립이나 투기가 되고 있는 실정이다. 그러나 우리나라와 같이 자원이 부족한 나라는 폐콘크리트와 같은 건설폐기물의 재활용에 많은 관심을 기울일 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 건물의 해체에 따라 발생하는 폐콘크리트를 폐기물매립장 저장시스템의 재료로서 사용하는 방안을 모색하여 보았다. 즉 폐콘크리트를 매립장의 바닥 차수층, 일일복토층, 중간복토층, 최종복토층, 침출수, 집배수층, 여과층 등의 주재료 및 보조재료로 활용하고자 하는 방안을 검토하여 보았다.

이를 위하여 폐콘크리트의 입도분석시험, 마모시험, 다짐시험, 강도시험, 투수시험, 침출수와와의 반응시험 등을 실시하여 이의 물리, 역학, 화학적 특성을 살펴보았다. 실험결과 폐콘크리트는 폐기물매립장에서의 혼합차수재, 집배수재 및 복토재 등으로서의 활용성이 가능한 것으로 나타났다.

2. 실험개요

2.1 사용시료

본 연구에서는 건설폐기물 중에서 콘크리트구조물 해체에 의하여 발생하는 폐콘크리트를 폐기물매립장의 저장시스템 재료로 활용하고자 하는 방안을 모색하여 보고자 한다. 폐콘크리트는 아파트 등의 공동주택, 도심빌딩, 교량, 보도블럭, 콘크리트포장 등의 해체공사시에 발생하며 관련업계에 따르면, 현재 전체 건물의 5%선에 불과한 해체대상 건물이 오는 90년대 말에는 22%, 2000년대에는 30% 이상으로 급격하게 증가할 것으로 예상되므로 발생량은 매년 증가할 것이기 때문에 이의 적절한 재활용 방안이 강구되어야 한다.

선진외국의 경우에는 폐콘크리트를 토지조성을 위한 성토재료, 토목건축공사에서의 되메움재료, 도로의 노반재료, 아스팔트 혼합물용 조골재 및 세골재, 콘크리트용 조골재 및 세골재 등에 많이 사용되고 있다. 그러나 폐콘크리트를 폐기물매립장 저장시설 재료로 활용하고자 하는 시도는 연구된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 국내의 경우 매립장에 단순매립 또는 투기되고 있는 폐콘크리트를 매립장 저장시설 재료의 일부로 사용하면 경제성 및 폐자원 재활용이라는 측면에서 매우 큰 의의가 있다고 판단되기 때문에 본 연구를 수행하게 되었다.

본 실험에 사용된 재료는 폐콘크리트 자체재료 및 폐콘크리트와 벤토나이트 혼합재료로 하였으며 이 경우 벤토나이트의 함량을 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40% 즉 폐콘크리트의 비율을 100, 95, 90, 85, 80, 70, 60%로 하였다. 여기에서 벤토나이트를 혼합한 이유는 벤토나이트는 투수저감 효과가 크므로 폐콘크리트의 투수계수를 낮출 수 있기 때문이다. 사용된 벤토나이트는 자연산의 칼슘 벤토나이트를 원소 치환한 나트륨 벤토나이트를 사용하였다.

페콘크리트 자체재료는 매립장 저장시설중에서 침출수 집배수층, 여과층, 일일 및 중간복토층, 가스이동층으로서의 활용성을 검토하고 페콘크리트 벤토나이트혼합재료는 매립장 저장시설중에서 차수층 및 최종복토층으로서의 활용성을 검토하였다.

2.2 실험방법

폐기물 매립장 시설재로서 페콘크리트의 적용성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 물리적 실험으로는 입도분석시험, 다짐시험, 투수시험, 마모시험 등을 실시하였고 역학적 실험으로는 일축압축강도 시험을 실시하였다. 그리고 화학적 실험으로는 침출수와의 반응성시험을 실시하였다. 여기에서 입도분석시험은 KS F 2302로 하였고 다짐시험은 KS F 2312의 A 다짐방법으로 하였으며 강도시험은 KS F 2314의 일축압축강도시험으로 하였다. 투수시험은 KS F 2322의 변수위 및 정수위 투수시험방식을 선택하고 강성벽(rigid wall) 투수시험기를 사용하였다. 투수시험시 시료포화는 공기압력을 사용하였고 투수계수 측정은 자연상태의 수두압력을 이용하였다. 강도시험 및 투수시험 시료는 다짐시험의 결과로부터 밀도는 최대건조밀도의 95% 그리고 함수비는 최적함수비에 2%를 더한 함수비로 하여 제작하였다. 마모시험은 KS F 2508 방법으로 하여 로스엔젤레스 마모시험기를 이용하였고 침출수와의 반응성시험은 김포매립지에서 발생하는 침출수와 페콘크리트 혼합재료와의 접촉에 의한 투수특성 변화를 살펴보았다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 기본특성

주재료인 페콘크리트의 입도분포를 살펴보면 그림 1 및 표 1에 제시된 바와 같다. 여기에서 보는바와 같이 채취된 원시료의 경우 최대입경은 20mm로 나타났으며 D_{10} 은 0.2mm, D_{60} 은 4.6mm로 나타나 곡률계수인 C_u 는 23.0으로 나타났다. 미국 환경보호청(US Environmental Protection Agency)에 의하면 폐기물 매립장 차수재로서 사용 가능한 점토류 입자의 최대 입경을 25~50mm 이하로 규정하고 있는 바 본 연구에 사용된 페콘크리트는 소정의 입도기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. 로스엔젤레스 마모시험기에 의한 페콘크리트의 마모율은 27.5%로 나타났는데 이는 우리나라 및 일본의 콘크리트용 골재 및 도로 기층용 골재의 기준치인 40%이하를 만족하고 있기 때문에 마모에 대한 저항성은 좋은 것으로 나타났다.

표 1. 주재료 및 첨가제의 공학적 특성

시료	물리적 성질	입도 분포			통일 분류	마모율 (%)
		D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	C_u		
페콘크리트	채취 시료	0.2	4.6	23.0	SW	27.5
	#4체 통과 시료	0.15	1.1	7.3	SW	
벤토나이트		0.008	0.04	50.0	CH	

3.2 다짐특성

페콘크리트 자체재료 및 페콘크리트와 벤토나이트의 혼합재료에 대한 다짐특성을 살펴보면 그림 2에 제시된 바와 같으며 여기에 도시된 다짐곡선으로부터 구한 각 재료의 최대건조밀도와 최적함수비를 살펴보면 표 2에 제시된 바와 같다. 그리고 벤토나이트 첨가에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화형태를 도식적으로 살펴보면 그림 3과 같다. 여기에서 보는 바와 같이 벤토나이트가 첨가됨에 따라 최대건조밀도는 감소하고 최적함수비는 증가함을 알 수 있다. 이는 벤토나이트가 첨가됨에 따라 벤토나이트의 팽창률이 증가하여 밀도가 감소되고 친수력이 큰 벤토나이트가 수분을 많이 흡수하여 함수량이 증가하였기 때문으로 보인다.

표 2. 다짐시험 결과

페콘크리트와 벤토나이트 혼합율	최대건조밀도 (g/cm^3)	최적함수비 (%)
C100% + B 0%	1.618	18.3
C 95% + B 5%	1.605	19.8
C 90% + B 10%	1.570	21.2
C 85% + B 15%	1.526	22.0
C 80% + B 20%	1.490	23.5
C 70% + B 30%	1.489	25.3
C 60% + B 40%	1.408	29.3

범례) C : 페콘크리트 B : 벤토나이트

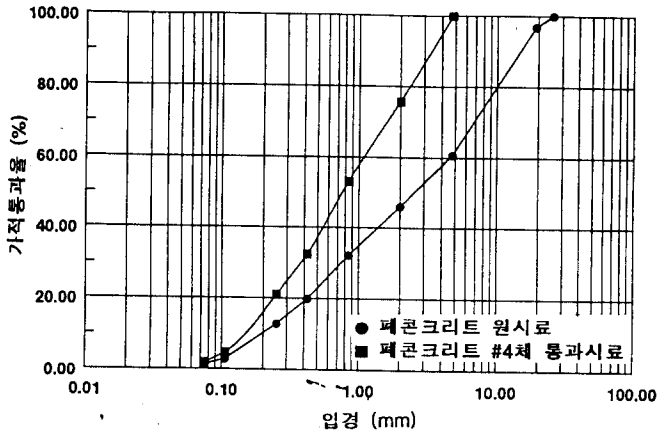


그림 1. 페콘크리트의 입도분포 곡선

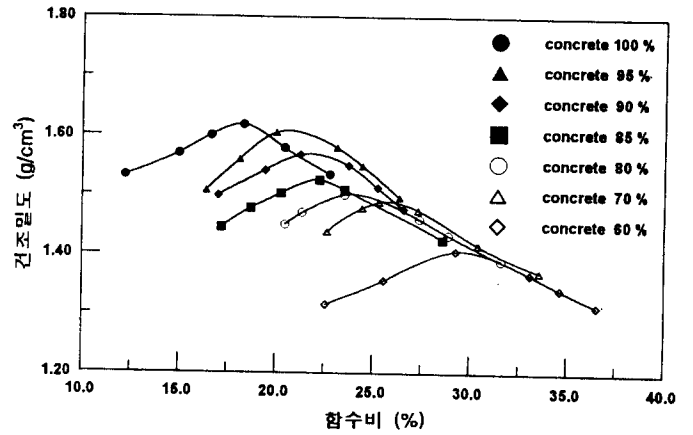
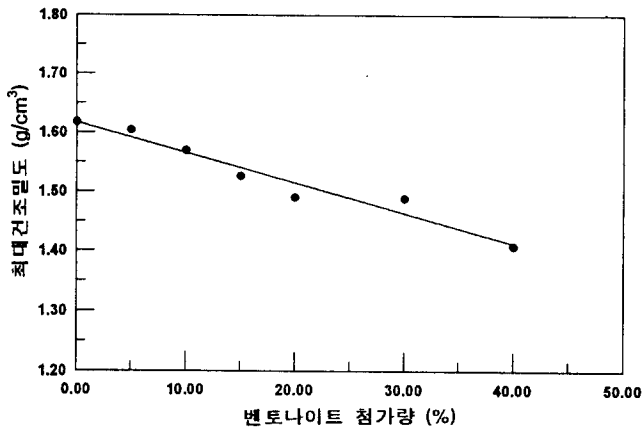
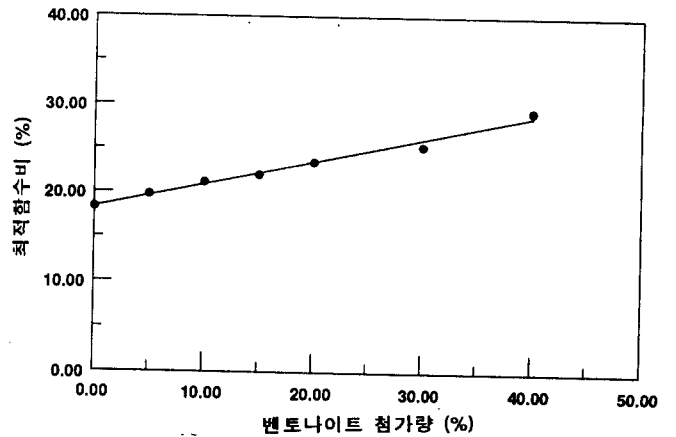


그림 2. 다짐곡선



(a) 최대건조 밀도 변화곡선



(b) 최적 함수비 변화곡선

그림 3. 벤토나이트 첨가에 따른 최대건조밀도와 최적함수비

3.3 강도특성

강도특성은 일축압축강도를 위주로 하여 살펴보았으며 혼합재의 종류에 따른 7일, 14일 및 28일 강도를 표 3에 나타내었고 이를 바탕으로 벤토나이트의 첨가량과 시간경과에 따른 강도특성 변화를 그림 4와 그림 5에 각각 도시하였다. 벤토나이트 첨가에 따른 페콘크리트 혼합재의 강도변화를 살펴보면 그림 4에서 보는 바와같이 대체적으로 1.55~3.02kg/cm² 사이에 강도수치가 분포되어 있으며 증감현상이 뚜렷하게 나타나고 있지않아 벤토나이트 첨가에 따라서는 강도 증감 효과가 크게 없음을 알 수 있다. 페콘크리트 혼합재의 재령기간, 즉 7일, 14일 및 28일에 따른 강도변화를 살펴보면 그림 5에서 보는 바와 같이 앞의 경우와 마찬가지로 재령기간에 따라서도 강도특성 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

표 3. 일축압축강도시험 결과

페콘크리트와 벤토나이트 혼합율	7일 강도 (kg/cm ²)	14일 강도 (kg/cm ²)	28일 강도 (kg/cm ²)
C100% + B 5%	1.950	1.556	2.562
C100% + B 10%	2.912	3.185	2.650
C100% + B 15%	3.021	2.278	2.737
C100% + B 20%	2.803	2.300	2.497

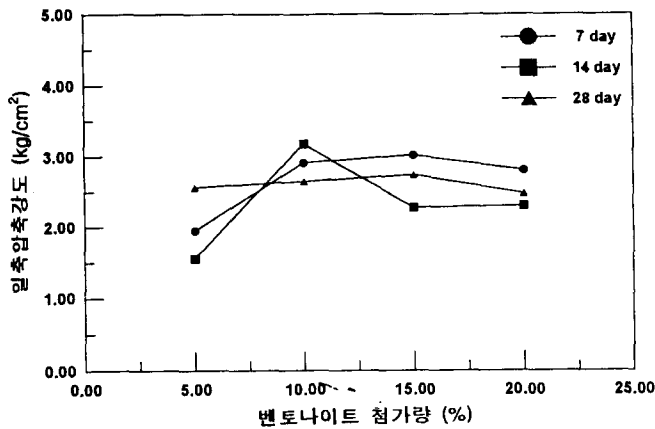


그림 4. 벤토나이트 첨가에 따른 강도특성

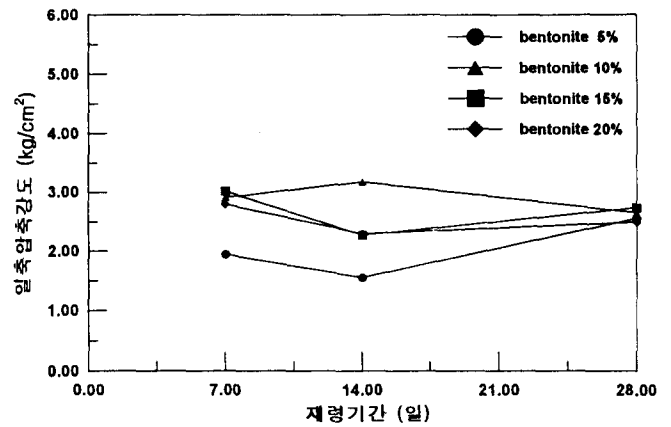


그림 5. 재령기간에 따른 강도특성

3.4 투수특성

차수재 및 집배수재의 투수특성에 따라 매립지내 침출수의 유출 및 배수가 좌우되기 때문에 투수특성은 차수재 및 집배수재의 중요한 특성이 라고 할 수 있다. 선진 외국에서는 각국별로 차수재 및 집배수재의 투수계수값을 선정하여 차수재 및 집배수재의 설계 및 시공시에 이를 반영하 다. 이를 살펴보면 미국환경보호청에서는 차수재의 경우에는 투수계수 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하 그리고 집배수재의 경우에는 $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이상을 요구하 고 있다. 따라서 본 실험에서는 페콘크리트 자체재료의 투수계수가 $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이상이 되는가 그리고 페콘크리트 혼합재의 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하가 되는 벤토나이트 첨가제 혼합비율이 어느 정도인가를 함께 검토하여 보았다.

각 혼합재에 대해 투수시험한 결과를 살펴보면 표 4와 같다. 표 4의 결과로부터 벤토나이트 첨가에 따른 혼합재의 투수특성을 도식적으로 나타 내어 보면 그림 6과 같은데 표 및 그림에서 보는 바와 같이 벤토나이트 첨가량이 증가함에 따라 투수계수가 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 벤토나이트를 첨가함에 따라 투수계수가 감소하는 것은 벤토나이트가 물과 만나게 되면 일반적으로 약 5에서 15배 정도 부피가 팽창하기 때문인 것 으로 보인다. 입도 조정된 페콘크리트 자체재료의 경우 자연다짐상태 조건에서는 투수계수가 $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이하가 되기때문에 매립장의 침출수 집 배수층으로 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 페콘크리트 혼합재료의 경우 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 가 되기 위한 벤토나이트 함량을 살펴 보면 약 25% 정도로 나타나 페콘크리트 혼합재를 폐기물매립장의 바닥차수재나 최종복토층의 차수층으로 사용할 경우 본 혼합율이 설계 기준치로 사용될 수 있다.

시간경과에 따른 페콘크리트 혼합재의 투수계수 변화양상을 살펴보기 위하여 벤토나이트를 30% 첨가한 페콘크리트 혼합재에 대하여 시간경과 에 따른 투수계수 변화형태를 살펴보았으며 이를 그림 7에 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 투수계수가 감소함 을 알 수 있다. 이와 같이 시간경과에 따라 투수계수가 감소하는 것은 혼합재내 벤토나이트의 팽창이 점차적으로 증가하기 때문이며 벤토나이트의 팽창이 거의 끝나고 평형상태에 도달하게 되면 일정한 값에 수렴하게 된다.

표 4. 투수시험 결과

페콘크리트와 벤토나이트 혼합율	투수계수 (cm/sec)	비 고
C 100 % + B 0 %	2.126×10^{-1}	#4채~#40채 시료, 자연 다짐상태
C 100 % + B 0 %	5.28×10^{-3}	#4채 통과 시료, 자연 다짐상태
C 100 % + B 0 %	1.319×10^{-4}	#4채 통과 시료, 95% 다짐상태
C 95 % + B 5 %	1.33×10^{-5}	#4채 통과 시료, 95% 다짐상태
C 90 % + B 10 %	9.717×10^{-6}	#4채 통과 시료, 95% 다짐상태
C 85 % + B 15 %	5.121×10^{-6}	#4채 통과 시료, 95% 다짐상태
C 80 % + B 20 %	8.815×10^{-7}	#4채 통과 시료, 95% 다짐상태
C 70 % + B 30 %	4.43×10^{-8}	#4채 통과 시료, 95% 다짐상태

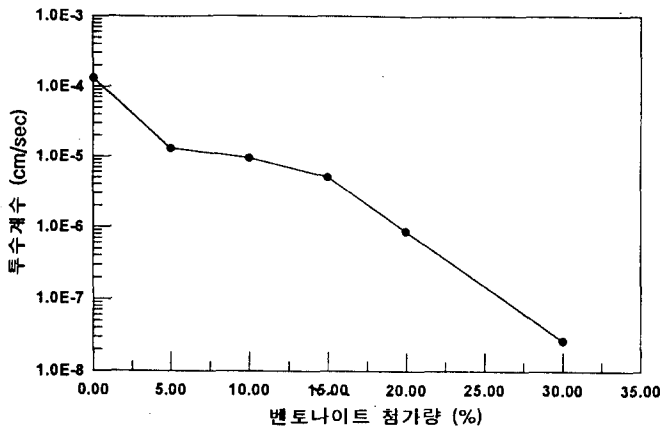


그림 6. 벤토나이트 첨가에 따른 투수특성

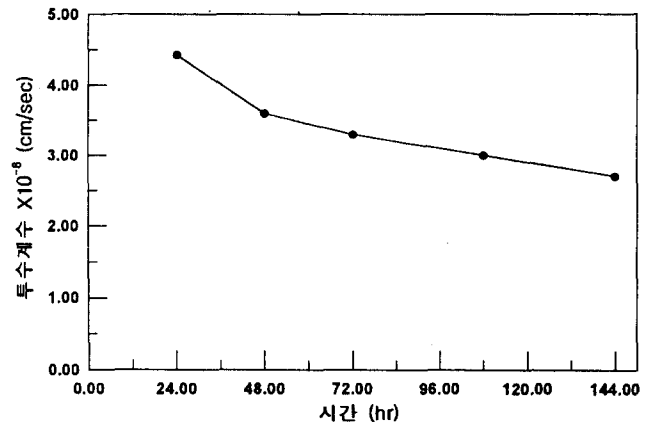


그림 7. 시간경과에 따른 투수특성

3.6 침출수와의 반응 특성

매립장에 사용되는 차수재는 물과 접촉함과 동시에 침출수성분과도 접촉하게 되기 때문에 이들에 대한 장기간 동안 안정성을 유지하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 벤토나이트가 30% 함유된 페콘크리트 혼합재에 대하여 김포매립장에서 채취된 침출수를 통과시켜 이의 투수특성 변화를 살펴보았다. 여기에 침투수로 사용된 침출수의 성분특성을 살펴보면 표 5에 제시된 바와 같다. 침출수 통과에 따른 페콘크리트 혼합재의 투수특성을 표 6에 제시하였는데 표에서 보는 바와 같이 초순수보다는 침출수 통과에 따른 투수계수가 약간 증가하는 것으로 나타났으나 그 차이는 매우 미소하기 때문에 본 연구에서 사용된 일반 폐기물 매립장에서 발생하는 침출수와의 반응성에 의한 투수성의 변화는 미약한 것으로 나타났다.

표 5. 침출수 특성

항 목	수 치 (ppm)
SS	243
TS	11,530
COD _{mn}	627
BOD	2,700

표 6. 침출수 통과에 따른 페콘크리트 혼합재의 투수특성

통 과 수	투수계수 (cm/sec)
초 순 수	2.7x10 ⁻⁸
김 포 침 출 수	4.7x10 ⁻⁸

4. 매립장 저장시설재로서의 활용분야 검토

폐기물 매립장의 차수, 집수, 여과, 복토 등의 재료로서는 통상 점토, 산토, 인공 합성 시이트, 모래, 자갈, 쇠석 등이 사용되고 있다. 그러나 이들 재료는 점차 고갈되고 있거나 구입상에 비용문제가 크게 작용하고 있다. 이와 같은 폐기물저장 시스템의 재료로서 페콘크리트가 대치되어 사용된다면 산업부산물 및 폐기물 재활용이라는 측면과 경제적인 측면에 있어서 큰 효과를 가지게 되는 바 매립장저장 시설재로서의 페콘크리트 활용분야를 검토하여 보았다.

4.1 위생 매립장 건설시의 활용 방안

- 1) 폐기물 저장시스템 중에서 바닥이나 법면부에 설치되는 차수층으로 사용될 수 있으며 콘크리트층만을 이용하여 차수층을 형성하거나 점토라 이너층 또는 차수시이트 상하부에 페콘크리트층을 설치하여 차수기능 보완층, 오염물질의 흡착 및 제거층, 차수막 보호층, 차수막 지지층 등을 형성하게 된다. 페콘크리트층은 페콘크리트 자체재료, 페콘크리트와 벤토나이트, 점토, 산토, 모래, 페타이어, 플라이애쉬 등의 혼합재료를 말한다.

- 2) 폐기물 저장시스템중에서 침출수 집배수층과 여과층으로 사용될 수 있으며 침출수 집배수층은 침출수 집수관로 주변에 설치되며 여과층은 집배수층 상부에 설치하게 된다.
- 3) 폐기물 저장시스템중에서 일일 복토층 및 중간 복토층으로 사용될 수 있으며 일일 복토층이나 중간 복토층을 독립적으로 채택할 수 있고 일일복토층과 중간복토층을 복합적으로 채택할 수 있다.
- 4) 폐기물 저장시스템중에서 최종 덮개시스템으로 사용될 수 있으며 최종 덮개시스템으로는 하부 완충층, 가스 이동층, 차수층, 배수층, 여과층, 최종복토층 등이 있으며 이들 구성요소중 어느 한 요소 또는 그 이상 요소를 페콘크리트로 사용한다.

4.2 불량 매립장 복구시의 활용 방안

- 1) 폐기물 저장시스템중에서 연직 차수시스템으로 사용될 수 있으며 연직차수벽 또는 연직차수벽의 일면이나 양면에 페콘크리트층을 설치하여 연직차수층, 차수기능 보완층, 오염물질의 흡착제층, 차수막 보호층 등의 역할을 한다.
- 2) 폐기물 저장시스템중에서 가스이동 및 방출층 등의 가스포집시설로 사용될 수 있으며 수평가스포집관, 연직가스포집관 주변에 페콘크리트층으로 가스이동 및 방출층을 형성하는 것으로 기존에 사용되고 있는 자갈, 쇄석 등의 재료 대신에 페콘크리트를 사용하는 것이다.
- 3) 폐기물 저장시스템중에서 집수정 주변의 골재층으로 사용될 수 있으며 저장시설 내부나 측면에 연직방향으로 설치되며 집수정 맨홀 주위에 페콘크리트층을 뒷채움하는 것으로 기존에 사용되고 있는 자갈, 쇄석 등의 재료 대신에 페콘크리트를 사용하는 것이다.

이상과 같이 페콘크리트를 폐기물 저장시스템에 사용함으로써 건설폐자재의 일종인 페콘크리트를 재활용하고, 기존의 차수층, 침출수 집배수층, 여과층, 복토층, 연직차수벽, 가스이동층 및 침출수 집수정 뒷채움재의 재료난을 해결하고 이의 기능을 보완하거나 대체할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

5. 결론

페콘크리트를 사용한 혼합재료에 대한 물리, 화학 및 역학적 시험을 실시하고 그 결과를 분석 고찰하여 폐기물매립장 시설재로서의 적합성을 평가하였다. 본 실험 연구에서 얻은 결론을 간략하게 요약하면 다음과 같다.

- 1) 페콘크리트 벤토나이트혼합재에서 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 최대건조밀도는 감소하고 최적함수비는 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 페콘크리트 벤토나이트혼합재의 강도는 벤토나이트의 첨가량이나 시간경과에 따라 증감효과가 크게 나타나지 않았다.
- 3) 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 그리고 시간이 경과함에 따라 투수계수는 감소하였으며 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 가 되기 위한 벤토나이트의 첨가량은 약 25% 정도로 나타나 차수재로서 사용될 때 기준치가 될 수 있다.
- 4) 입도조정된 자연다짐상태의 페콘크리트는 투수계수가 $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이상이 되기 때문에 침출수 집배수재로서의 활용이 가능한 것으로 나타났다.
- 5) 일반폐기물 침출수와와의 반응성에 의한 투수특성 변화는 미약한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 정하익의 3인(1995), 불량매립지 차폐방안 및 차폐재와 침출수의 반응성에 관한 연구, 한국지반공학회 '95 봄학술발표회 논문집, pp.191-198.
2. 한국건설기술연구원(1992), 도시폐기물 매립장의 건설부지 활용과 위생 매립 시스템에 관한 연구, pp.82-128.
3. Henry E. Haxo(1985), Liner materials for hazardous and toxic wastes and municipal solid waste leachate, Pollution Technology Review No. 124, 435p.
4. US EPA(1983), Lining of waste impoundment and disposal facilities, 448p.
5. 本多淳裕, 山田(1990), 建設系廢棄物の處理と再利用, 省エネルギーセンター, 339p.