

폐기물 매립장의 차수재 및 복토재로서 하수 슬러지 재활용

Reuse of Water Treatment Sludge as Liner and Cover Materials in Waste Landfills

이 용 수*1

Lee, Yong-Soo

정 하 익*2

Jeong, Ha-Ik

Abstract

The potentiality of water treatment sludge as the alternative liner and cover materials in landfills is investigated. A series of tests were performed on sludge admixtures to examine their compaction, compressive strength, leaching, hydraulic conductivity characteristics and the compatibility with representative leachate within landfills. Results from the tests show that low hydraulic conductivity can be achieved with sufficient stabilizer contents and curing. It is recognized that the hydraulic conductivity decreases with increasing bentonite content and the percentage of bentonite needed to make the hydraulic conductivity below 1×10^{-7} cm/sec was 40% for water treatment sludge. It was found that the effect of the municipal waste leachate on the hydraulic conductivity of the admixtures is negligible.

요 지

현재, 하수 슬러지가 매립장에 주로 단순 매립되고 있는데, 이를 폐기물 매립장의 차수재 또는 복토재로 활용한다면 산업부산물의 재활용이라는 측면에서 큰 잇점이 있을 것이다. 이를 위하여 본 논문에서 하수 슬러지에 대한 다짐, 강도, 투수, 화학반응성 및 용출시험 등을 실시하여 매립장의 복토재 또는 차수재로서의 활용성을 검토하였다. 실험결과, 하수슬러지 혼합재는 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 최대건조밀도는 증가하고 최적함수비는 감소하는 것으로 나타났다. 하수슬러지 혼합재의 강도는 벤토나이트의 첨가량이나 경과시간에 따라 증감효과가 크게 나타나지 않았다. 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 그리고 시간이 경과함에 따라 투수계수는 감소하였으며 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec가 되기 위한 벤토나이트의 첨가량은 약 40%정도로 나타났다. 이는 차수재로서 하수슬러지를 활용한다면 벤토나이트 첨가량을 40%이상을 요구하며, 반면 복토재로 활용한다면 벤토나이트 첨가량이 20%이내임을 알 수 있다. 하수슬러지 혼합재

*1 정희원, 한국건설기술연구원, 지반연구실, 연구원

*2 정희원, 한국건설기술연구원, 지반연구실, 선임연구원

의 침출수와 반응성에 의한 투수특성 변화는 미약한 것으로 나타났다.

Keywords : Water treatment sludge, Cover material, Waste landfills, Liner

1. 서론

정수장 및 하수처리장에서는 수처리 과정을 통하여 정수 및 하수 슬러지가 발생된다. 이러한 정수 및 하수 슬러지의 발생량은 매년 증가하고 있으며 이들은 부분적으로 퇴비, 건설자재, 토공재료, 연료 등에 이용되고 있으나 국내에서는 아직까지도 대부분을 매립장에 매립되고 있는 실정이다. 매립되고 있는 슬러지는 매립장내 매립물의 함수비 증가, 수렁조성 그리고 침출수 유공관의 구멍메움 등의 현상을 초래하여 매립장내에서도 많은 문제점을 유발시키고 있다. 이렇게 단순매립되고 있는 슬러지를 매립장의 차수재나 복토재로 활용할 수만 있다면 매립으로 인한 문제점도 해결하고 폐기물을 재활용한다는 측면에서 큰 이점이 있다고 볼 수 있다.

하수 슬러지의 재활용에 관한 연구로 Alleman and Berman(1984)은 슬러지를 가열하여 슬러지내의 유기물을 제거하여 경화벽돌을 제조하는 분야를 연구하였으며 Koenig(1996)는 슬러지의 전단강도와 압밀특성 등 공학적 특성을 연구하였다. 국내에서는 천병식의 2인(1992)은 슬러지를 토목재료에 이용할 수 있는 방안을 연구하였으며, 김영관의 3인(1993)은 성토재 및 복토재 활용성을 연구하였고, 조홍재, 유남재(1995)는 매립지의 차수재 및 복토재로써 하수슬러지 적용성을 평가 하였다.

본 논문에서는 정수장에서 수처리과정에서 발생하는 하수 슬러지가 주로 단순매립되고 있는바, 이를 재활용한다면 경제성 및 폐자원 재활용이라는 측면에서 매우 큰 의의가 있다고 판단되기 때문에 이를 폐기물매립장의 차수층, 복토층 등 저장시스템의 재료로 활용하고자 하는 방안을 모색하여 보았다. 이를 위하여 하수

슬러지의 입도분석시험, 다짐시험, 강도시험, 투수시험, 침출수와 반응시험 및 용출시험 등을 실시하여 하수 슬러지의 물리·역학 특성과 화학적 특성을 살펴보았다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 사용시료

본 실험에 사용된 주재료는 경기도의 K정수장에서 매립장으로 이송되기 직전에 채취된 하수슬러지를 사용하였다. 하수슬러지 자체는 투수성이 매우 크기때문에 차수재 또는 복토재로 직접 사용될 수는 없으며, 차수성을 감소시키기 위해 첨가제를 혼합해야 한다. 본 시험에서는 하수 슬러지의 투수성을 저감시키기 위한 첨가제로서 벤토나이트를 선정하였다. 주재료인 하수슬러지는 No. 4체를 통과한 시료를 사용하였으며, 벤토나이트의 첨가비는 중량비에 따라 10, 20, 30, 40%로 하였다.

2.2 실험방법

폐기물 매립장 차수재 및 복토재로서 하수슬러지의 적용성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 기본물성시험, 역학적 실험과 화학적 실험을 실시하였다. 기본물성실험으로는 입도분석, 단위중량 등을 실시하였으며 역학적 실험으로는 다짐실험, 강도실험, 투수실험을 실시하였다. 다짐실험은 A 다짐방법에 따라 실시하였고, 강도시험은 일축압축강도시험을 실시하였으며 시편의 제작은 직경 5cm, 높이 12cm인 몰드를 사용하였다. 투수시험은 변수위 투수시험법으로 실시하였고 시험몰드는 직경 10cm, 높이가 12cm인 몰드를 사용하였다. 그리고 화학적 실험은 침출수와 반응성 시험을 실시하

였고 하수슬러지의 유해성 여부를 판단하기 위한 폐기물 공정시험법에 의한 용출시험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기본특성

주재료인 하수슬러지와 첨가제인 벤토나이트의 기본특성을 표 1에 나타내었다. 채취된 하수슬러지의 원시료 최대입경은 4.6mm이고

D_{10} 은 0.42mm, D_{60} 은 2.41mm, 곡률계수 C_u 는 5.74, 균등계수 C_g 는 1.01로 나타났다. 이는 미국 환경보호청(US Environmental Protection Agency)에서 폐기물 매립장 차수재로서 사용 가능한 점토류 입자의 최대 입경을 25~50mm 이하로 규정하고 있는 바, 본 연구에 사용된 하수슬러지는 소정의 입도 기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

또한, 화학적 특성을 살펴보기 위하여 침출수를 사용하였는데 이에대한 특성을 표 2에 나타내었다.

표 1. 하수슬러지의 기본특성

시료	입 도 분 포						비중	분류
	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_g	No.200통과량(%)		
하수슬러지	0.42	1.01	2.41	5.74	1.01	1.06	1.87	Pt
벤토나이트	0.008	0.018	0.038	4.75	1.07	89.27	1.70	-

표 2. 침출수 특성

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

적함수비는 벤토나이트 첨가량에 따라 감소하였으며 감소폭은 약 30%정도 함수비가 감소한 것으로 나타났다. 이는 슬러지 자체의 보수력이 벤토나이트에 비하여 크기 때문으로 생각된다.

3.2 다짐특성

하수슬러지와 벤토나이트의 혼합재에 대한 다짐특성을 그림 1에 나타내었고 벤토나이트 첨가에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화를 그림 2에 도시하였다. 그림에서보는 바와 같이 벤토나이트가 첨가됨에 따라 최대건조밀도는 증가하였으며, 증가폭을 살펴보면, 벤토나이트 량이 증가할수록 최대건조밀도는 13% 정도 증가하였다. 이는 벤토나이트의 입자가 슬러지의 입자에 비하여 상대적으로 작고 슬러지의 간극속으로 벤토나이트가 충전되어 혼합재가 조밀하여졌기 때문으로 보인다. 한편, 최

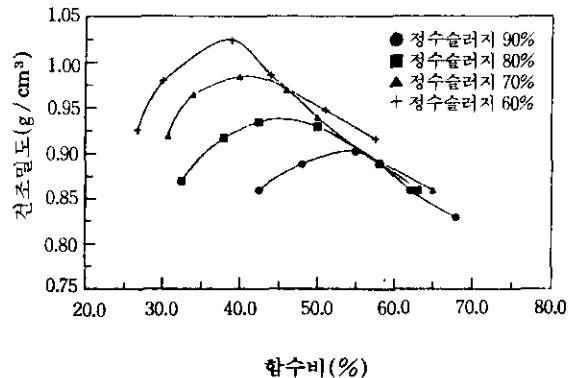
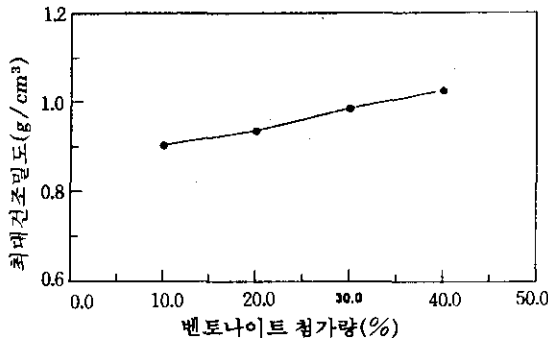
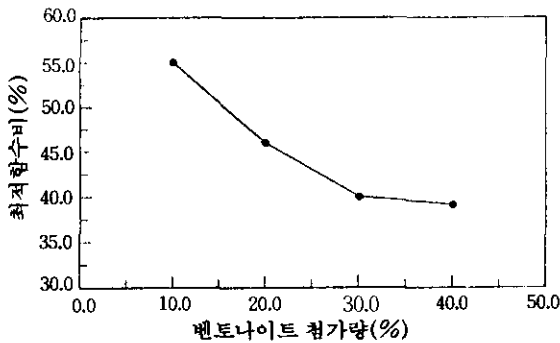


그림 1. 하수 슬러지 혼합재의 다짐곡선



(a) 최대전조밀도 변화곡선



(b) 최적함수비 변화곡선

그림 2 벤토나이트 첨가에 따른 하수슬러지 혼합재의 최대전조밀도와 최적함수비

3.3 강도특성

강도특성은 일축압축강도를 중심으로 살펴 보았으며, 벤토나이트의 혼합비에 따른 재령 7일, 14일 및 28일 강도실험 결과를 표 3에 나타 내었고, 벤토나이트의 첨가량과 시간경과에 따 른 강도특성 변화는 그림 3과 그림 4에 각각 나타내었다.

벤토나이트 첨가에 따른 하수슬러지의 강도 변화를 살펴보면, 그림 3에서 보는 바와같이 강도의 변화는 대체적으로 1.0~2.1kg/cm²사 이에 분포되어 있다. 그림에서와 같이 벤토나 이트 첨가량에 따른 강도의 변화는 약 2배정도 증가현상이 나타났는데, 이는 슬러지내의 물이

벤토나이트 첨가로 인하여 벤토나이트가 슬러 지내의 물을 흡수하여 슬러지의 입자밀도가 증 가된 것으로 생각된다.

한편, 재령 7일, 14일 및 28일에 따른 강도변 화는 그림 4에 나타내었으며, 그림에서와 같이 재령기간에 따른 강도변화는 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 하수슬러지에 벤토나이트 혼 합에 따른 강도의 영향은 슬러지의 밀도를 증

표 3. 하수슬러지 차수재의 일축압축강도시험 결과

하수슬러지 차수재의 종류	일축압축강도(kg/cm ²)		
	7일	14일	28일
하수슬러지+벤토나이트			
90%+10%	1.13	1.09	1.01
80%+20%	1.29	1.44	1.59
70%+30%	1.88	1.69	1.58
60%+40%	2.11	-	2.17

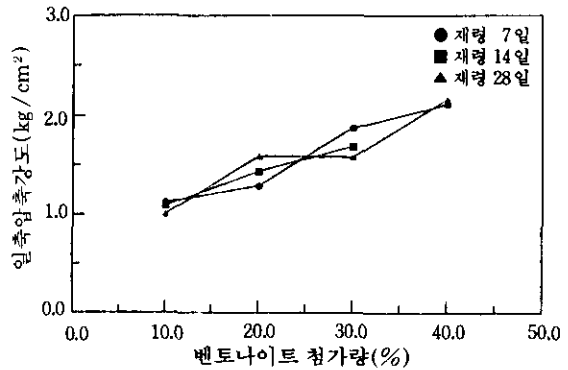


그림 3 벤토나이트 첨가에 따른 하수슬러지 혼합재의 강도특성

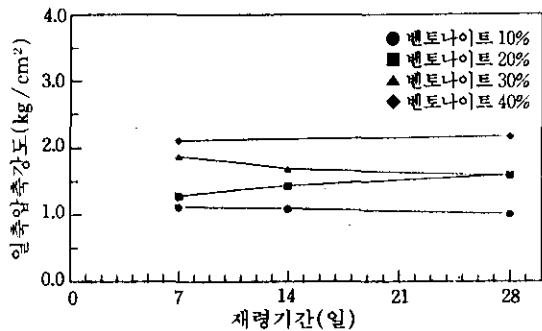


그림 4 재령기간에 따른 하수슬러지 혼합재의 강도특성

가 시키는 영향을 주는 반면 재령에 대해서 영향을 주지 못함을 알 수 있다.

3.4 투수특성

차수재 및 복토재의 투수특성에 따라 매립지 내 침출수의 생성 및 유출이 좌우되기 때문에 투수특성은 차수재 및 복토재에서 중요한 특성이라고 할 수 있다. 미국 환경보호청에서는 차수재의 경우 투수계수 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하를 요구하고 있으며 국내에서도 이를 기준으로 하고 있다. 따라서 본 실험에서는 하수슬러지의 차수재로 사용할 경우, 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하가 되는 벤토나이트 첨가제 혼합비율이 어느 정도인가를 함께 검토하여 보았다.

투수실험 결과, 벤토나이트 첨가에 따른 혼합재의 투수특성을 표 4와 그림 5에 나타내었는데 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 팽창하고 입도분석 시험결과 벤토나이트의 유효입경(D_{10})이 0.008이고 슬러지의 유효입경은 0.42로 벤토나이트의 콜로이드 입자가 하수 슬러지와 혼합되면 투수계수의 감소에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

하수슬러지 혼합재의 경우 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하가 되기 위한 벤토나이트 함량을 살펴보면 약 40% 정도로 나타났다. 이는 하수슬러지 혼합재를 폐기물 매립장의 차수재로 활용한다면 혼합율이 설계 기준치로 사용 가능성이 있고, 경제적 측면을 고려한다면 벤토나이트의 혼합비 40%는 다소 경제성이 떨어지므로 복토재로서의 사용이 더욱 유리할 것이다.

시간경과에 따른 하수슬러지 혼합재의 투수계수 변화를 살펴보기 위하여 벤토나이트를 30%와 40% 첨가한 혼합재에 대하여 시간경과에 따른 투수계수 변화형태를 살펴보았으며 이를 그림 6에 도시하였다. 그림에서 알 수 있는

바와 같이 시간이 경과함에 따라 투수계수가 감소함을 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. 하수슬러지 혼합재의 투수시험 결과

하수슬러지 혼합재의 종류	투수계수(cm/sec)	
	7일	28일
하수슬러지+벤토나이트		
90%+10%	1.8×10^{-5}	1.7×10^{-5}
80%+20%	1.5×10^{-5}	1.4×10^{-5}
70%+30%	8.9×10^{-7}	5.2×10^{-7}
60%+40%	3.8×10^{-7}	1.3×10^{-7}

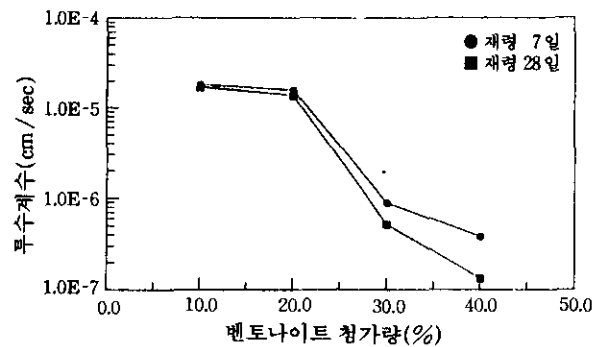


그림 5 벤토나이트 첨가량에 따른 하수슬러지 혼합재의 투수특성

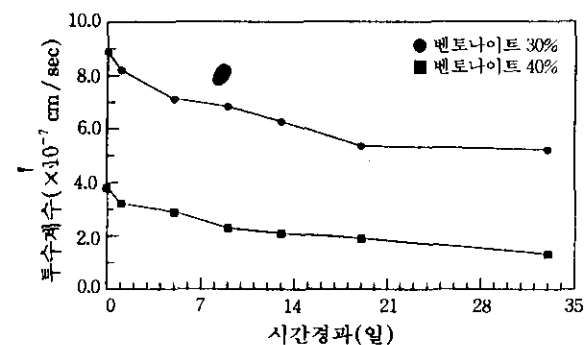


그림 6 시간경과에 따른 하수슬러지 혼합재의 투수특성

3.5 화학반응특성

매립장에 사용되는 차수재 및 복토재는 물과 접촉함과 동시에 침출수 성분과도 접촉하게 되기 때문에 이들에 대한 장기간 동안 안정성을 유지하여야 한다. 따라서, 본 논문에서는 벤토나이트가 30%와 40% 함유된 하수슬러지 혼합재에 대하여 침출수와 반응에 의한 투수특성 변화를 살펴보았다. 실험에 사용된 침출수의 성분특성은 표 2에 제시된 바와 같다. 침출수 통과에 따른 하수슬러지 혼합재의 투수특성을 표 5에 제시하였는데 표에서 보는 바와 같이 초순수보다는 침출수 통과에 경우가 투수계수가 약간 증가하는 것으로 나타났다. 이 차이는 매우 미소하기 때문에 본 연구에서 사용된 일반폐기물 매립장에서 발생하는 침출수와 반응성에 의한 투수성의 변화는 미약한 것으로 나타났다.

침출수 통과시 시간경과에 따른 하수슬러지 혼합재의 투수특성 변화를 살펴보면 그림 7과 같으며 그림에서 보는 바와같이 시간경과에 따라 투수계수가 점차 감소됨을 알 수 있다.

표 5. 하수슬러지 혼합재의 침출수 통과에 따른 투수특성

하수슬러지 차수재	투수계수(cm/sec)
하수슬러지+벤토나이트 70%+30%	6.2×10^{-7}
60%+40%	3.2×10^{-7}

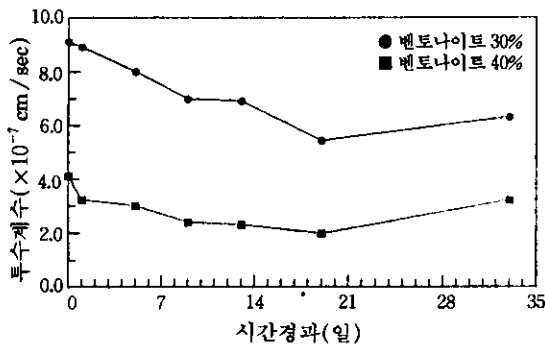


그림 7 침출수와 반응기간에 따른 하수 슬러지 혼합재의 투수특성

3.6 용출특성

본 연구에 사용된 하수슬러지에 유해물질의 함유정도를 파악하여 폐기물의 유해성과 비유해성을 판별하기 위하여 용출실험을 실시하였다. 용출실험은 최근에는 폐기물을 유해물질과 비유해물질로 분류하는데 사용되고 있으며, 개정된 폐기물 관리법에서는 일반폐기물과 특정폐기물을 분류하는 방법으로 용출실험이 사용된다.

시험방법은 시료액의 조절과 용출조작으로 구분되며 시료액의 조절은 적당량의 시료를 정제수에 염산을 넣어 pH를 5.8~6.3으로 한 용매(ml)를 1:10(W:V)의 비율로 혼합하고 혼합액이 500ml 이상 되도록 한다. 이렇게 시료액의 조제가 끝난 후 혼합액을 상온, 상압에서 진탕혼수가 매 분당 약 200회, 진폭 4~5 cm의 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한 다음 여과하고 여과액을 적당량 취하여 용출시험용 검액한다. 시간 경과 후 각각의 시간에 상정액을 뽑아 고액분리한 후 여과액 내의 중금속 농도를 분석하였다. 만약 여과가 어려운 경우 원심분리를 사용하여 매 분당 3,000회전 이상으로 20분 이상 원심분리한 다음 용출 검액한다.

용출시험 결과를 표 6에 제시하였는데 실험

표 6. 하수슬러지 용출시험 결과

(단위: mg/l)

평가항목	시험결과	기준치
Cd	0.05 이하	0.3 이상
CN ⁻	0.16	1.0 이상
Pb	0.2 이하	3.0 이상
Cr ⁺⁶	0.01 이하	1.5 이상
As	0.09	1.5 이상
Hg	0.0005 이하	0.005 이상
Cu	0.96	3.0 이상
유기인(Org.P)	0.1 이하	1.0 이상
Trichloroethylene	0.05 이하	0.3 이상
Tetrachloroethylene	0.02 이하	0.1 이상

대상인 시료의 유해성을 판정한 결과, 아주 소량이지만 CN 은 0.16 mg/l, Cu는 0.96 mg/l 정도 검출 되었다. 이는 평가 기준치보다 작게 검출되었고 대부분의 평가항목은 기준치 이하로 나타났다.

4. 결 론

하수슬러지를 사용한 혼합재에 대한 물리, 화학 및 역학적 시험을 실시하고 그 결과를 분석 고찰하여 폐기물매립장 차수재 및 복토재로서의 적합성을 평가하였다. 본 실험 연구에서 얻은 결론을 간략하게 요약하면 다음과 같다.

- (1) 하수슬러지 혼합재에서 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 최대진조밀도는 증가하고 최적 함수비는 감소하는 것으로 나타났다.
- (2) 하수슬러지에 벤토나이트 혼합에 따른 강도의 영향은 슬러지의 밀도를 증가시키는 영향을 주는 반면, 재령에 대해서 영향을 주지 못함을 알 수 있다.
- (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 40% 정도로 나타났으며, 경제적인 측면을 고려하면 차수재보다는 복토재로서의 활용성이 클 것으로 생각된다.
- (4) 하수 슬러지 혼합재에 대한 침출수와의 반응성 시험결과, 투수변화는 증류수와 비교하여 미약한 것으로 나타났다.
- (5) 용출시험결과로 하수슬러지는 폐기물 공정시험법에서 제시하는 유해성 중금속이 기준치 이하로 나타났다.

- (6) 현재 매립장에 단순 매립되고 있는 하수 슬러지를 매립장의 복토재 또는 차수재 등의 시설재로 활용하는 것이 가능한 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 정하익, 이용수, 심한인, 우제윤(1995), "불량매립지 차폐방안 및 차폐재와 침출수의 반응성에 관한 연구," 한국지반공학회 '95 봄학술발표회 논문집, pp.191~198.
 2. 건설교통부(1995), 폐기물 매립지 차수재 개발, 연구보고서, KICT/95-GE-1202, 한국건설기술연구원, 295p.
 3. 조홍재(1995), 안정화시킨 도시하수슬러지의 매립지 복토재 및 차수재 활용 가능성, 강원대학교 대학원, 110p.
 4. 서울특별시(1992), 하수슬러지 최종 처리, 처분 방안 개선 연구, 한국건설기술연구원,
 5. 천병식, 김영환, 오민열(1992), "토공재로서의 정수장 슬러지의 토질공학적 특성," 대한토목학회 학술발표회 개요집, 대한토목학회, pp. 543~546.
 6. Daniel, D. E.(1993), Geotechnical Practice for Waste Disposal, Chapman & Hall, 683p.
 7. Koenig, A., J. N. Kay(1996), "The Geotechnical Characterization of Dewatered Sludge from Wastewater Treatment Plants," Proceedings of the 3rd International Symposium Environmental Geotechnolgy, pp. 73~82.
 8. Alleman, J. E., and A. B. Neil(1984), "Constructive Sludge Management : Biobrick," Journal of Environmental Engineering, Vol. 110, No. 2, April, ASCE, pp.301~311.
- (접수일자 1996. 3. 6)