

슬러지 및 안정화시킨 하수 슬러지의 물리적·역학적 특성

Physical and Mechanical Properties of Waterwaste Sludge and Stabilized Sludge

송 창 섭
Song, Chang Seob

Abstract

An experimental investigation was carried out to study the feasibility of using the stabilized sludge, as a backfill and cutoff-water materials for embankment structures. For stabilizing of sludge, hydrated lime and quick lime were used as additive, and a series of tests were performed on the sludge and the stabilized sludge to examine their physical and mechanical properties, compaction, compressive strength, hydraulic conductivity and consolidation characteristics.

From the test results, physical and mechanical properties of the stabilized sludge were improved as compared with the sludge. Especially from the viewpoint of physical property, consolidation or settlement and cutoff-water, quick lime is more effective than the hydrated lime as a stabilization additive. But, viewpoint of compaction and shear strength, hydrated lime is more effective than the quick lime as a stabilization additive.

As a result of this study, it was found that the stabilized sludge can be developed the backfill and cutoff-water materials, improved the stabilizing method of sludge.

I. 서 론

전국의 산업폐기물 발생량 중 유기물계는 전체의 약 30% 정도를 차지하고 있으며, 그 비율은 점차 증가하고 있는 실정이다.¹⁾ 특히, 가정 하수 슬러지는 발생량이 급격하게 증가될 것으로 추정되고 있다. 슬러지는 상하수처리과정에서 발생하는 폐기물로 수중의 오탁물질을 침전시킨 찌꺼기와 같은 상태의 물질로 오염농도가 높고 고함수비여서 처리과정에 많은 어려움을 나타낸다.

슬러지를 처리하는 방법은 소각, 토양살포, 퇴비

화, 매립, 해양투기, 안정화/고형화처리 등이 있다. 그러나, 소각방법은 높은 함수비 때문에 비용이 많이 들고 유해성분으로 인한 대기의 오염 등의 염려가 있으며, 농지나 산지 등의 토양에 살포하면 중금속 성분 등으로 인하여 토양의 오염 또는 강우시 지하수나 지표수의 오염 등을 유발할 수 있다. 또, 최근에 연구되고 있는 하수 슬러지의 퇴비화는 유기성 슬러지에 한하여 제한적으로 사용할 수는 있으나 슬러지에 함유된 유해성 물질로 인하여 대규모 사용은 어려운 실정이며, 과거에 주로 사용되었던 해양투기는 국제협약에 의하여

* 충북대학교 농과대학

키워드 : 슬러지, 안정화, 안정화된 슬러지, 고형화 기법

제2의 환경오염을 발생시킨다는 이유로 규제의 대상이 되고 있다.

그래서 현재 대부분의 슬러지는 탈수 케익 상태로 매립장에 매립되고 있는 실정이다. 그러나, 고탍수비에 따른 취급 불편, 높은 운반비용, 유입수에 의한 재오니화, 재오니화된 슬러지로 인한 수령조성, 침출수 유공관의 구멍메움 등의 문제점을 보이고 있다. 이러한 문제점을 보완하고 환경적인 피해를 줄일 수 있는 방법으로 연구되고 있는 것이 안정화/고형화 처리방법이다. 그러나, 이 방법도 첨가제 성분에 따른 고결차이 등의 문제점이 있으나, 현재까지의 연구결과에 의하면 안정화/고형화 처리방법이 흡착효과가 두드러지고 용출억제 효과가 탁월하므로 이에 대한 연구를 더욱 발전시키면 안정화된 슬러지를 성토재나 퇴비음제로 재활용이 가능할 것이다.

하수 슬러지의 재활용에 관한 연구로 Alleman and Berman(1984)은 슬러지를 가열하여 슬러지 내의 유기물을 제거하여 경화벽돌제조에 적용하였으며, Koenig(1996)은 슬러지의 전단강도 및 압밀특성 등 공학적 특성을 연구하였다. 국내에서는 천 등(1992)이 슬러지를 토목재료에 이용할 수 있는 방안을 연구하였고, 김 등(1992)은 성토재, 복토재로 활용성을 검토하였으며, 조 등(1994)은 매립지의 차수재, 복토재의 활용성을 검토하였으며, 김 등(1997)은 슬러지를 소성가열시켜 인공토양의 제조 및 농자재화 가능성을 타진하는 등 슬러지의 재활용에 관한 연구가 활발해지고 있으나, 정수장 슬러지에 한정되거나 고비용 등으로 실용화가 되지 못하고 일과성 연구에 머무르는 수준이다. 그리하여 하수장에서 발생하는 막대한 양의 슬러지가 주로 단순매립되고 있는 바, 이를 재활용한다면 경제성, 폐자원의 이용이라는 측면 뿐만 아니

라 농경지를 보호하는 농공학 측면에서도 그 의미가 크다고 생각된다.

따라서, 본 연구에서는 하수 슬러지의 토질공학적 재이용을 위한 기초단계로서 하수 슬러지의 물리적·역학적 특성을 규명하고 이를 바탕으로 첨가제의 종류를 달리하여 슬러지를 안정화시킨 후, 안정화시킨 슬러지의 기초물성시험, 다짐시험, 투수시험, 일축압축시험 등을 통하여 성토재 또는 퇴비음재 개발의 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 사용시료

본 연구에 사용된 주재료는 청주시 하수종말처리장에서 발생하는 탈수 케익 상태의 슬러지로, 매립지로 이송직전에 채취하였다. 채취시 슬러지의 함수비는 약 380% 정도이며, 감열감량은 약 52.0%이다. 안정화시키기 위한 첨가제는 일반적으로 많이 사용되는 소석회와 생석회를 사용하였다.

Table 1은 사용된 슬러지의 물리적 특성을 나타낸다. 생석회는 국내에서 생산되는 B사의 제품, 소석회는 S사 제품으로 한국산업규격에 맞도록 생산된 제품이다.

2. 실험방법

채취한 탈수 케익 상태의 슬러지를 기건시킨 후 잘게 부수어 사용하였다.

먼저, 슬러지의 물리적·역학적 특성을 규명하기 위하여 기본물성시험으로 입도분석, 비중시험, 액·소성한계시험, 감열감량시험 등을 행하였으며, 역학적 실험으로 다짐시험, 투수시험, 압밀시험, 일축압축시험 등을 한국산업규격에 따라 실시

Table 1. Physical properties of sludge used

Gs	Atterberg limits		Grain size distribution						Li (%)	USCS
	LL(%)	PI(%)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	C _u	C _κ	#200 잔류량		
1.86	192.7	122.0	0.004	0.051	0.065	16.3	10.0	10.0	52.0	OH-Pt

하였다.

또, 안정화에 필요한 소석회 또는 생석회의 증량비를 산정하기 위하여 건조 슬러지의 증량에 대한 첨가제의 비율을 달리하여 pH-meter를 사용하여 경과시간에 따른 pH 변화를 측정하였으며, 이로부터 안정화에 필요한 각 첨가제의 적정증량비를 도출하였다.

앞에서 구한 첨가제의 적정증량비로 안정화시킨 슬러지의 물리적·역학적 특성을 분석하기 위하여, 안정화 조건을 만족시키는 소석회 및 생석회의 증량비로 혼합한 시료는 약 24시간 정도 방치하여 안정시킨 후, 한국산업규격에 따라 다짐시험, 압밀시험, 투수시험, 강도시험 등을 행하였다. 다짐시험은 A-다짐방법에 따라 소석회 및 생석회로 안정화시킨 시료의 최적함수비, 최대건조밀도를 구하였다. 이를 바탕으로 직경 5cm, 높이 10.0cm의 몰드를 사용하여 최적함수비 상태로 안정화시킨 시료의 공시체를 제작하여 경과시간에 따른 압축강도시험을 수행하였다. 압밀시험은 안정화시킨 시료를 액성한계로 조제하여 고정형 압밀링에 설치하여 한국산업규격에 따라 침하량을 측정하여 간극비와 압밀하중과의 관계를 도출하였다. 또, 압밀상자 상부에 뚜껑을 설치하여(송, 1998) 각 하중단계에서 투수계수를 측정하여 간극비, 압밀하중 또는 투수계수와 상관관계를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 안정화 시험

슬러지의 안정화는 첨가제의 주입량을 충분히 가하여 오랫동안 보관 후에도 요구 pH 이하로 감소하지 않아 병원균의 사멸과 부패방지, 냄새를 억제시킬 수 있도록 하여야 한다. 이러한 조건은 최소한 pH를 12로 2시간 이상 유지시켜야 하는데, 이를 위하여 pH를 12.5로 30분간 유지시키면 되는 것으로 알려져 있다(조, 1994). 또한, 슬러지의 안정화에는 소석회나 생석회를 일반적으로 사용하고

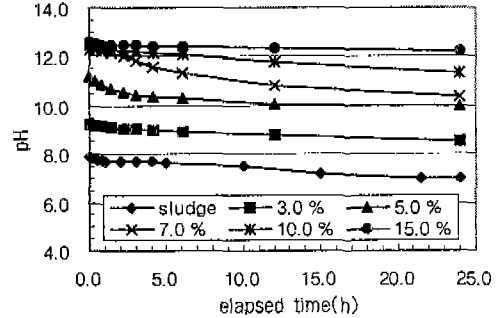


Fig. 1. Change of pH for hydrated lime stabilized sludge

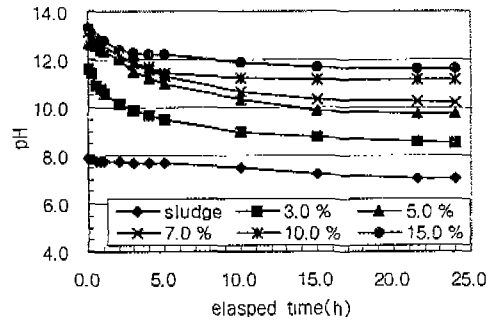


Fig. 2. Change of pH for quick lime stabilized sludge

있으며, 소석회보다는 생석회가 효과적인 것으로 알려져 있다.

Fig. 1과 2는 소석회 및 생석회의 첨가비율을 달리하여 시간의 경과에 따른 pH를 도시한 것이다. 안정화 조건을 만족시키는 증량비는 소석회의 경우 약 7%, 생석회의 경우는 약 5% 이상으로 나타나고 있다. 따라서, 본 연구에서는 소석회 7%, 생석회 5%를 안정화 조건으로 택하였다.

2. 물리적 특성 비교

Table 2는 슬러지, 소석회 및 생석회로 안정화시킨 시료의 물리적 특성을 비교한 것이다.

비중은 슬러지에 비하여 안정화에 따라 약간씩 증가하는 것으로 나타나는데 이는 슬러지 속에 함유된 수분과 첨가제의 반응에 의한 것이며, 생석회로 안정화시킨 시료가 약간 크게 나타나고 있

Table 2. Physical properties of sludge and stabilized sludge used

	Gs	LL(%)	PI(%)	k(cm/s)	expansion	remark
sludge	1.860	193.0	122.0	6.82×10^{-6}	very high	OH-Pt
sludge+hydr. lime	1.905	117.2	85.0	3.31×10^{-6}	very high	
sludge+quick-lime	1.909	105.2	71.0	2.06×10^{-6}	very high	

다. 또, 슬러지의 비중은 감열감량과 밀접한 관계를 가지는데, 後蘇 등(1981)은 식(1)을, 김(1992)은 식(2)의 관계를 제시하였다. 본 연구에서 측정된 비중은 1.86으로 後蘇의 식에 의한 1.96과 김의 식에 의한 1.80사이에 들어 이들의 관계식을 검증해 주고 있다.

$$\text{비중} = -0.0153 \times (\text{감열감량}) + 2.76 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{비중} = -0.0179 \times (\text{감열감량}) + 2.7321 \quad \dots\dots\dots(2)$$

액성한계 및 소성지수는 안정화에 따라 급격하게 감소하여 공학적 특성이 개선되는 것으로 나타났으며, 또한 투수계수도 안정화에 따라 약 50~70% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이는 소석회 및 생석회가 슬러지 속에 함유된 수분과 반응한 결과로 추측되는데, 이러한 효과는 소석회보다 생석회가 두드러져 물리적 특성면에서는 생석회로 안정화시키는 것이 더 효과적인 것으로 판단된다.

또, 유기물 함유량은 고형화 또는 농자재의 개발에 많은 영향을 미치게 되는데, 後蘇의 방법에 의하면 유기물 함유량은 약 35.4%이다.

3. 다짐특성

Fig. 3은 슬러지와 안정화시킨 시료의 다짐곡선을 도시한 것이다. 슬러지의 최적함수비는 약 71.9%, 최대건조단위중량은 0.742tf/m^3 이었다. 또, 소석회로 안정화시킨 시료는 최적함수비가 46.3%, 최대건조단위중량이 0.901tf/m^3 , 생석회로 안정화시킨 시료는 최적함수비가 52.6%, 최대건조단위중량이 0.877tf/m^3 으로 탈수계의 상태의 슬러지에 비하여 확연하게 다짐이 개선되는 것으로 나타났다. 즉, 최적함수비는 생석회의 경우는 슬러지에

비하여 약 26.8%, 소석회인 경우 35.6%정도 감소하였으며, 최대건조단위중량은 생석회의 경우 슬러지에 비하여 약 18.2%, 소석회의 경우는 약 21.4%정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 안정제의 첨가로 슬러지 속의 수분의 감소뿐만 아니라 첨가제의 영집작용에 의하여 다짐효과를 높일 수 있는 것으로 생각된다. 따라서, 다짐측면에서는 소석회로 안정시키는 것이 시공성, 단위중량 등이 생석회보다 효과적임을 알 수 있다.

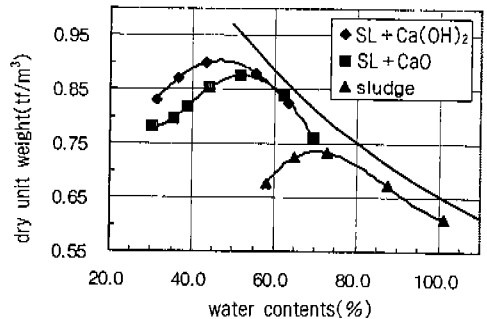


Fig. 3. Compaction curves of sludge and stabilized sludge

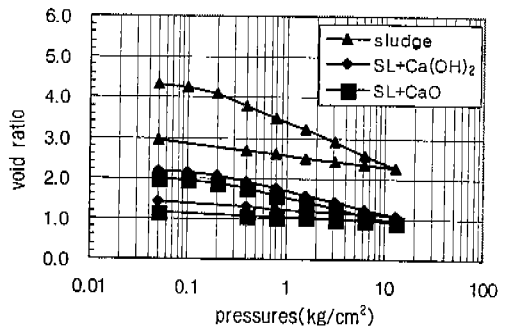


Fig. 4. The e-log P curves of sludge and stabilized sludge

4. 압축특성

Fig. 4는 슬러지와 안정화시킨 시료의 압밀시험의 결과를 하중-간극비 곡선으로 도시한 것이다. 여기서도 마찬가지로 안정화에 따라 초기 간극비가 슬러지에 매우 작게 나타나 성질이 개선됨을 간접적으로 확인할 수 있다. 또, 슬러지 및 안정화된 시료의 압축특성을 분석하기 위하여 Fig.4를 바탕으로 압축지수 및 팽창지수를 비교하면 Fig.5와 같다. 압축성은 슬러지에 비하여 안정화시킨 시료는 약 47.2%~50.0% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 생석회로 안정화시킨 시료가 소석회로 안정화시킨 시료보다 약간 압축성이 낮은 것으로 나타났다.

또, 점토와 같은 압축성이 큰 흙의 경우에는 압밀하중 또는 외부하중에 따른 간극비를 예측하여 침하량을 추정할 수 있는데, 슬러지의 경우에도 이러한 이론의 성립을 검토하기 위하여 액성한계상태의 간극비로 정규화하여 도시하면 Fig. 6과 같이 아주 깊은 상관관계를 나타내었다($r^2=0.991$). 이들의 관계는 식 (3)과 같으며, 이 식을 이용하여 외부에서 작용하는 하중에 따른 간극비를 추정하여 압밀침하량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

$$e/e_L = 0.761 - 0.108 \cdot \log P \dots\dots\dots (3)$$

여기서, e 는 간극비, e_L 은 액성한계 상태의 간극비, P 는 압밀하중을 의미한다.

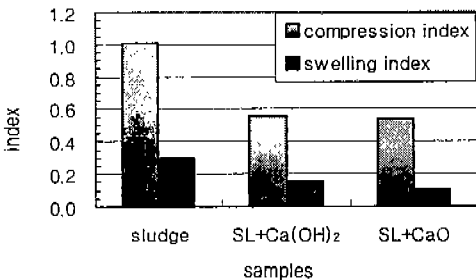


Fig. 5. Compression and swelling indices of sludge and stabilized sludges

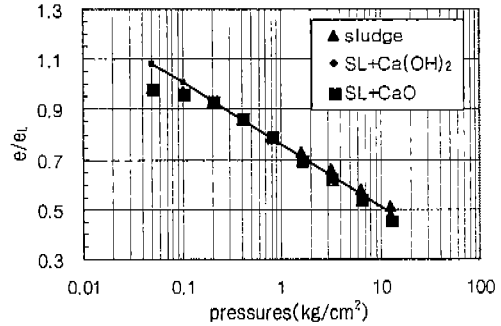


Fig. 6. Normalized void ratio for sludge and stabilized sludges

5. 투수특성

Fig. 7은 슬러지, 소석회 및 생석회로 안정화시킨 시료의 하중에 따른 투수계수를 도시한 것이다. 초기 투수계수는 액성한계 상태에서의 투수계수를 의미한다. 슬러지의 경우, 압축성이 크기 때문에 하중의 증가에 따라 투수계수의 변화가 크게 나타나는 반면, 안정화시킨 시료는 투수계수의 변화가 미소함을 알 수 있다. 또한, 차수를 목적으로 하는 경우에는 소석회보다 생석회로 안정화시키는 것이 효과적으로 나타났다.

일반적으로 투수계수는 시료의 간극비와 밀접한 관계가 있으므로, 하중에 따른 투수계수의 변화상태를 규명하기 위하여 정규화된 간극비(e/e_L)와 투수계수와와의 관계를 도시하면 Fig. 8과 같다. 즉, 투수계수와 정규화된 간극비는 일정한 대수관계가 있음이 증명되었다. 그림에서 기울기가 생석회 안정시료, 소석회 안정시료, 슬러지 등의 순서로 나타나 하중에 따른 투수계수의 변화가 생석회 안정처리 시료가 가장 작은 것으로 나타나 차수적인 측면에서는 생석회로 안정화하는 것이 효과적임이 다시 입증되었다. 이들의 상관관계식은 식(4)~식(6)와 같다.

슬러지 : $e/e_L = 5.809 + 0.932 \cdot \log k \dots\dots (4)$

소석회 첨가 : $e/e_L = 9.647 + 1.579 \cdot \log k \dots\dots (5)$

생석회 첨가 : $e/e_L = 15.394 + 2.528 \cdot \log k \dots\dots (6)$

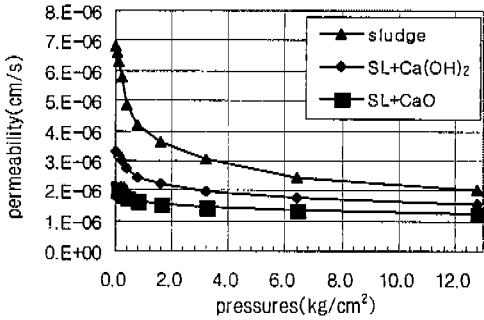


Fig. 7. Coefficients of permeability of sludge and stabilized sludges

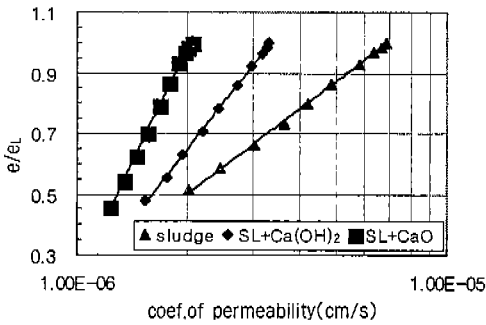


Fig. 8. Relationships normalized void ratio between coefficient of permeability

여기서, k 는 각 하중단계에서 압밀이 종료된 후 측정된 투수계수이다.

따라서, 이들 식과 앞 절에서 언급한 간극비-하중과의 관계식과 연관시키면 슬러지 및 안정시료의 투수계수 또는 투수량, 침투량 등을 추정할 수 있게 된다.

6. 강도특성

슬러지 및 안정화시킨 시료의 강도특성을 규명하기 위하여 공시체의 경과시간에 따라 체적변화 및 일축압축강도를 측정하여 분석하였다.

Fig. 9 및 Fig. 10은 슬러지 및 생석회로 안정화시킨 시료의 경과시간에 따른 응력-변형률 곡선을 도시한 것이다. 슬러지의 경우, 경과시간에 따라

압축강도의 증가는 미미하게 나타나지만, 안정화된 시료의 경우, 압축강도의 증가는 급격하게 증가되는 반면 취성이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 소석회로 안정화시킨 시료에서도 비슷한 결과를 보였다. 이를 좀더 명확하게 하기 위하여 피크시의 강도 및 변형률을 도시하면 Fig. 11과 같다. 공시체를 제작한 초기에는 경과시간에 따라 급격한 변화를 보이거나 그 이후에는 완만하게 나타나는데, 이는 공시체 내의 함수비와 첨가재의 반응에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 12는 슬러지 및 안정화된 시료의 압축강도를 경과시간에 따라 도시한 것이다. 그림으로부터 슬러지에 비해 압축강도는 약 26%~72% 정도 증가하는 것을 볼 수 있으며, 강도적인 측면에서는 소석회로 안정화시키는 것이 효과적임을 알 수 있다. 또, 이러한 강도는 성토재나 퇴매움재로의 조

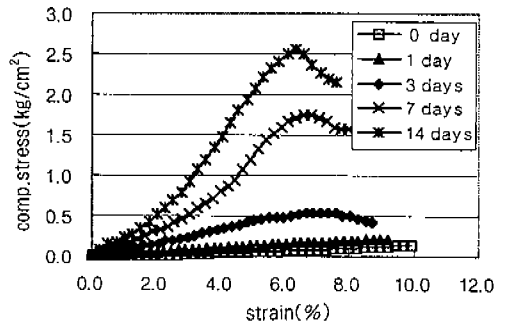


Fig. 9. Stress-strain relationships for sludge

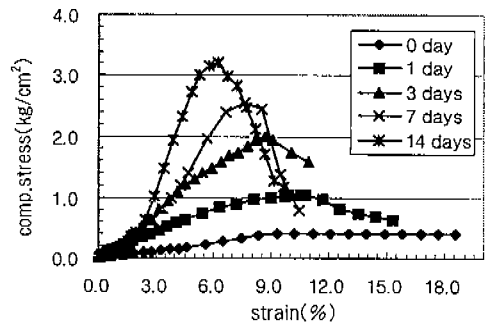


Fig. 10. Stress-strain relationships for quicklime stabilized sludge

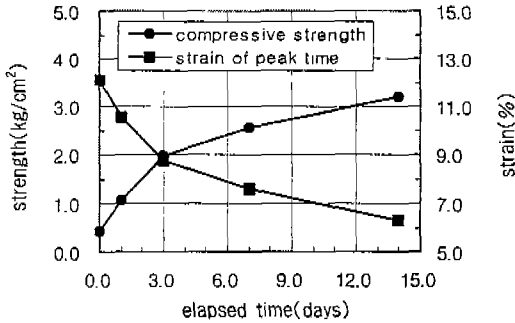


Fig. 11. Compressive strength and strain of peak time for quicklime stabilized sludge

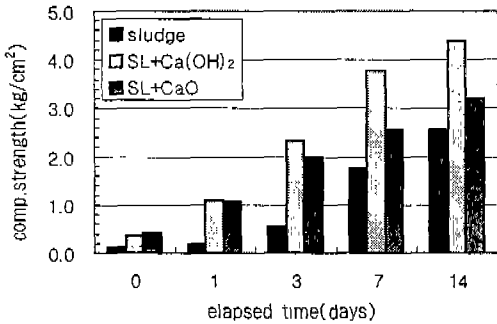


Fig. 12. Compressive strength of sludge and stabilized sludges

건을 만족시키지는 못하지만 안정화를 위한 첨가재만에 의하여 나타난 강도이므로 이 시료에 다른 첨가재 또는 재료를 혼합한다면 충분한 강도를 발휘할 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

탈수케익 상태로 매립되고 있는 하수슬러지의 재활용 가능성을 검토하기 위한 기초연구로서, 청주지역 하수종말처리장의 하수슬러지를 사용하여 물리적 및 역학적 특성을 분석하고, 소석회 및 생석회로 안정화시킨 슬러지의 각 특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 슬러지의 안정화에 필요한 첨가재의 중량비는 소석회는 약 7%, 생석회는 약 5%정도 첨가하면 안정화 조건을 만족시키는 것으로 나타났다.

2. 슬러지를 안정화시키면 비중은 증가하고, 액성한계 및 소성지수는 감소하는 것으로 나타나 물리적 특성이 개선되는데, 소석회보다는 생석회가 효과적인 것으로 나타났다.

3. 안정화된 시료는 슬러지보다 건조단위중량은 약 20%정도 증가하고, 최적함수비는 약 30%정도 감소하여 다짐특성이 매우 개선되는 것으로 나타났으며, 다짐측면에서는 생석회보다 소석회가 효과적인 것으로 나타났다.

4. 안정화 시료의 압축성은 슬러지보다 약 50% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 생석회로 처리한 시료가 소석회로 처리한 시료보다 압축성이 약간 작은 것으로 나타났다.

5. 슬러지 및 안정화된 시료도 점토질 흙과 마찬가지로 정규화된 간극비와 압밀하중이 대수관계를 보였으며, 이를 이용하여 압밀하중에 따른 간극비를 추정할 수 있었다.

6. 안정화시킨 시료의 투수계수는 슬러지에 비해 급격하게 감소하여 차수재료의 가능성을 보였으며, 정규화된 간극비와 투수계수는 대수관계를 나타내었다.

7. 슬러지의 안정화에 따라 압축강도는 약 26%~72%정도 개선되는 것으로 나타났으며, 경과시간에 따라 취성이 나타나기도 했다. 강도측면에서는 생석회보다 소석회로 안정화시키는 것이 약 46% 정도 효과적인 것으로 나타났다.

8. 슬러지 및 안정화시킨 슬러지의 물리적 및 역학적 특성을 분석한 결과, 안정화시킨 시료만으로는 토공재료 또는 성토재료로서 사용은 어려우나, 안정화 기법 또는 기타 첨가재의 추가 등으로 특성을 개선한다면 물리적·역학적으로는 충분히 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 1995, 폐기물 매립지 차수재 개발, 연구보고서 KICT/95-GE-1202, 한국건설 기술연구원, pp. 295-300.
2. 김선주, 윤춘경, 이남출, 1997, 슬러지를 이용

- 한 인공토양 생산 및 농자재화 가능성 연구. 한국농공학회지 39(5), pp. 64-70.
3. 김영한, 1992, 정수장 슬러지의 건설재료로서의 이용가능성에 관한 연구, 한양대학교대학원 석사학위 논문, pp. 51-59.
 4. 김인배, 1994, 하수슬러지의 시멘트계 고형화에 의한 유효이용에 관한 연구, 중앙대학교대학원 박사학위 논문, pp. 13-34.
 5. 박순원, 1991, 하수슬러지와 정화조 폐액의 토지주입에 관한 연구, 고려대학교대학원 박사학위논문, pp. 33-41.
 6. 송창섭, 1998, 벤토나이트-흙/모래 혼합토의 압축 및 투수특성 연구, 한국농공학회지 40(2), pp. 123-129.
 7. 송창섭, 권현일, 1999, 안정화시킨 슬러지의 역학적 특성, 1999년도 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp. 599-605.
 8. 조흥재, 1994, 안정화시킨 도시 하수 슬러지의 매립지 복토재 및 차수재 활용 가능성, 강원대학교대학원 석사학위 논문, pp. 15-27.
 9. 천병식, 김영한, 오민열, 1992, 토공재료로서의 정수장 슬러지의 토질공학적 특성, 대한토목학회 학술발표회 개요집, pp. 543-546.
 10. Alleman, J. E. and A. B. Neil, 1984, Constructive sludge management : Biobrick, J. of environmental engineering div., ASCE 110(2), pp. 301-311.
 11. Berry, P.L. and T. J. Poskitt, 1972, The consolidation of peat, Geotechnique 22(1), pp. 27-52.
 12. Diniel, D. E., 1993, Geotechnical practice for waste disposal, Chapman & Hall, pp. 683-690.
 13. Kamon, M. and S. Nontanannandh, 1991, Combining industrial wastes with lime for soil stabilization, J. of Geotech. Engrg. div., ASCE 117(1), pp. 1-17.
 14. Koenig, A., J. N. Kay, 1996, The geotechnical characterization of dewatered sludge from wastewater treatment plants, preceeding of the 3rd international symposium environmental geotechnology, pp. 73-83.
 15. Roy, A. et al., 1991, Solidification/stabilization of a heavy metal sludge by a portland cement/fly ash binding mixture, hazardous waste and hazardous materials 8(1), pp. 33-41.
 16. 後藤光龜 等, 1981, 上水汚染の 有效利用, 日本用水と 廢水 23(9), pp. 3-12