안정화시킨 슬러지의 역학적 특성

Mechanical Properties of the Stabilized Sludge

송 창 섭*(충북대) · 권 현 일(충북대)
Song, Chang seob · Kwun, Hyeon Il

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 was used as additive, and a series of tests was performed on the sludge and the stabilized sludge to examine their physical properties, compaction, compressive strength, hydraulic conductivity and consolidation characteristics.

From the test results, the physical and mechanical properties of the stabilized sludge were more 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 stabilization additive. But, viewpoint of compaction and shear strength, hydrated lime is more effective than the quick lime as stabilization additive.

As a result of this study, it was founded 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. 특히, 가정 하수슬러지는 발생량이 급격하게 증가될 것으로 추정되고 있다.

슬러지 처리에 많이 사용되는 방법은 소각, 토양살포, 퇴비화, 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 높은 중금속 성분 등으로 인하여 토양의 오염 또는 강우시 지하수나 수자원의 오염 등을 유발할 수 있다. 또, 최근에 연구되고 있는 하수슬러지의 퇴비화는 유기성 슬러지에 한하여 제한적으로 사용할 수는 있으나, 슬러지에 함유된 유해성 물질로 인하여 대규모 사용은 어려운 실정이며, 과거에 주로 사용되었던 해양투기는 국제협약에 의하여 제2의 환경오염을 발생시킨다는 이유로 규제의 대상이 되고 있다.

1999 학년도 한국농공학회 학술발표논문집 (1999년 10월 16일)

그래서 현재 대부분의 슬러지는 탈수케익 상태로 매립장에 매립하고 있는 실정이다. 그러나, 고함수비에 따른 취급 불편, 높은 운반비용, 유입수에 의한 재오니화, 재오니화된 슬러지로 인한 토지 재사용의 제약 등의 문제점을 보이고 있다. 이러한 문제점을 보완하고 환경적인 피해를 줄일 수 있는 방법이 최근에 연구되고 있는 안정화/고형화 처리방법이다. 그러나, 이 방법도 첨가재나 기후적은 영향 등의 문제점이 있으나, 현재까지의 연구결과에 의하면 안정화/고형화 처리방법이 흡착효과가 두드러지고 용출효과가 탁월하므로 이에 대한 연구를 더욱 발전시키면 안정화된 슬러지를 성토재나 되메움재로 재활용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 하수슬러지의 토질공학적 재이용을 위한 기초단계로 첨가재를 달리하여 안정화시킨 하수슬러지의 물리적, 역학적 특성을 규명하고자 한다.

Ⅱ. 재료 및 실험방법

2.1 재료

재료는 청주시 하수종말처리장에서 발생되는 탈수케익 상태의 슬러지로 채취시 함수비는 약 380 %였으며, 이 슬러지를 기건 또는 노건조하여 사용하였으며, 첨가재로서 일반적으로 하수슬러지의 안정화에 이용되는 소석회와 생석회를 사용하였다.

Table 1은 사용된 탈수케익 슬러지의 물리적 특성을 나타낸다. 생석회는 국내에서 생산되는 B사의 제품, 소석회는 S사 제품을 사용하였다.

Table 1. Physical and mechanical properties of sludge used.

Gs	Atterberg limits (%)		Grain size distribution (%)						Li (%)	USCS
	LL	PI	0.425 mm	0.109 mm	0.090 mm	0.074 mm	0.01 mm	0.002 mm		
1.86	192.7	122.0	100.0	98.0	95.0	90.0	14.2	9.4	52.0	OH

2.2 실험방법

시료는 탈수케익 상태의 슬러지를 기건 또는 노건조한 후, 잘게 부수어 사용하였다.

먼저, 안정화에 필요한 소석회 또는 생석회의 중량비를 선정하기 위하여 pH-meter를 사용하여 경과시간에 따른 pH 변화를 측정하였다. 이로부터 각 첨가재의 적정중량비를 도출하였다.

안정조건을 만족시키는 소석회 및 생석회의 중량비로 혼합한 시료는 약 24 시간정도 방치하여 안정시킨 후, 한국공업규격에 맞게 다짐시험, 압밀시험, 투수시험, 강도시험 등을 행하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1 안정화 시험

슬러지의 안정화는 첨가재의 주입량을 충분히 가하여 오랫동안 보관 후에도 요구 pH이하로 감소하지 않아 병원균의 사멸과 부패방지, 냄새를 억제시킬 수 있도록 하여야 한다. 이러한 조건은 최소한 pH를 12로 2시간이상 유지시켜야 하는데, 이를 위하여 pH를 12.5로 30분간 유

지시키면 되는 것으로 알려져 있다. 또한, 슬러지의 안정화에는 소석회나 생석회를 일반적으로 사용하고 있으며, 소석회보다는 생석회가 효과적인 것으로 알려져 있다.

Fig. 1은 소석회 및 생석회의 첨가비율을 달리하여 시간의 경과에 따른 pH를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 위의 안정화 조건을 만족시키는 주입량은 소석회의 경우 약 7 %, 생석회의 경우는 약 5% 이상으로 나타나고 있다. 따라서, 본 연구에서는 소석회 7 %, 생석회 5 %를 안정화 조건으로 택하였다.

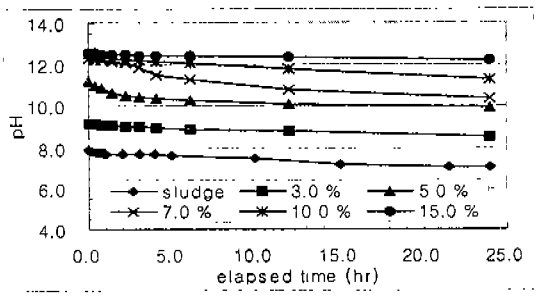

Fig.1 Change of pH for hydrated lime stabilized sludge.

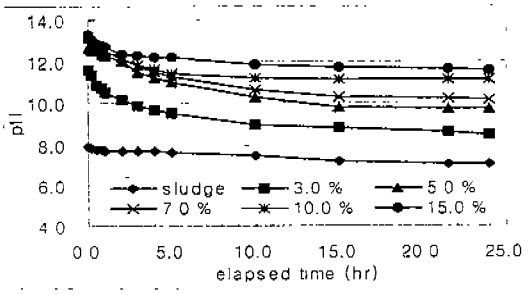

Fig.2 Change of pH for quick lime stabilized sludge.

3.2 물리적 특성 비교

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

비중은 슬러지에 비하여 안정화에 따라 약간씩 증가하는 것으로 나타났으며, 생석회로 안정화시킨 시료가 약간 크게 나타났다. 액성한계, 소성지수 및 투수계수는 안정화에 따라 급격하게 감소하여 공학적 특성이 개선되는 것으로 나타났다. 또한, 소석회보다는 생석회가 물리적 특성면에서는 더 효과적인 것으로 나타났다.

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^{-5}	very high	OH-Peat
sludge+lime	1.905	117.2	85.0	3.31×10^{-6}	very high	
sludge+quicklime	1.909	105.2	71.0	2.06×10^{-6}	very high	

3.3 다짐특성

Fig. 3은 슬러지와 안정화시킨 시료의 다짐곡선을 도시한 것이다. 안정화시킨 시료는 탈수케익 상태의 슬러지에 비하여 확연하게 다짐효과가 개선되는데, 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. 즉, 다짐측면에서는 소석회로 안정시키는 것이 시공성, 단위중량 등이 생석회보다 효과적임을 알 수 있다.

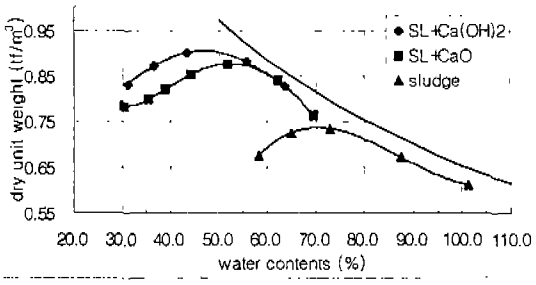

Fig.3 Compaction curves of sludge and stabilized sludge.

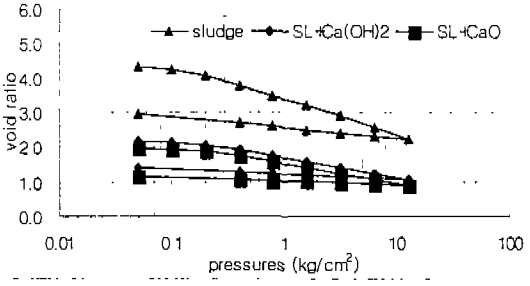

Fig.4 The e-log P curves of sludge and stabilized sludge.

3.4 압밀특성

Fig. 4은 슬러지와 안정화시킨 시료의 하중-간극비 곡선을 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 안정시킨 시료가 소석회로 안정화시킨 시료보다 약간 압축성이 낮은 것으로 나타났다.

또, 점토 또는 압축성이 큰 흙의 경우에서는 압밀하중 또는 외부하중에 따른 간극비를 예측하여 침하량을 추정할 수 있다. 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 (1)과 같으며, 이 식을 이용하여 외부에서 작용하는 하중에 따른 간극비를 추정하여 압밀침하량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

$$e/e_L = 0.761 - 0.108 \cdot \log P \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, e는 간극비, e_L은 액성한계 상태의 간극비, P는 압밀하중을 의미한다.

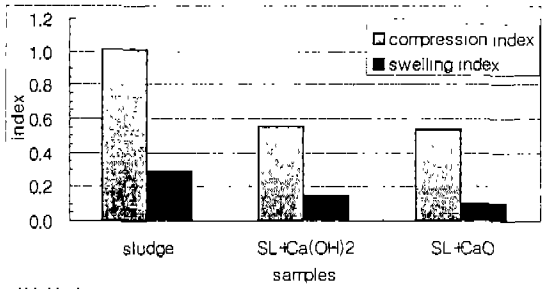

Fig.5 Compression and swelling indices of sludge and stabilized sludges.

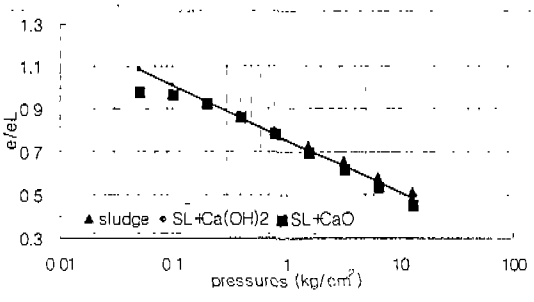

Fig.6 Normallized void ratio for sludge and stabilized sludges.

3.5 투수특성

Fig. 7은 슬러지와 소석회 및 생석회로 안정화시킨 시료의 압밀하중에 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, 차수적인 면에서는 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 투수계수와의 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(2) ~ 식(4)와 같다.

슬러지 : $e/e_L = 5.809 + 0.932 \cdot \log k$ ····· (2)

소석회 첨가 : $e/e_L = 9.647 + 1.579 \cdot \log k$ ····· (3)

생석회 첨가 : $e/e_L = 15.394 + 2.528 \cdot \log k$ ····· (4)

여기서, k는 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.

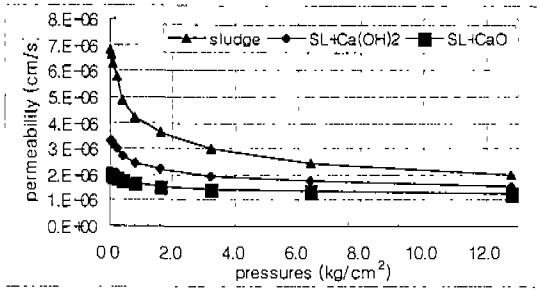

Fig.7 Coefficients of permeability of sludge and stabilized sludges.

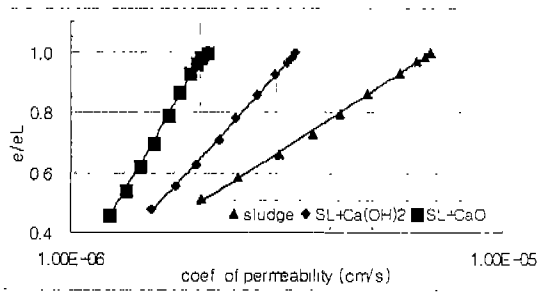

Fig.8 Relatioships normallized void ratio between coefficient of permeability.

3.6 강도특성

재령에 따른 시료의 강도특성을 규명하기 위하여 제작된 공시체의 재령에 따라 체적변화 및 압축강도를 측정하였다.

Fig. 9 및 Fig. 10은 슬러지 및 생석회로 안정화시킨 시료의 재령에 따른 응력-변형률 곡선을 도시한 것이다. 슬러지의 경우, 재령에 따라 압축강도의 증가는 미미하게 나타나지만, 안정

화된 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 재령에 따라 급격한 변화를 보이나 그 이후에는 완만하게 나타났다. Fig.12는 슬러지 및 안정화된 시료의 압축강도를 도시한 것이다. 그림으로부터 슬러지에 비해 압축강도는 약 26%~72%정도 증가하는 것을 볼 수 있으며, 강도적인 측면에서는 소석회로 안정화시키는 것이 효과적임을 알 수 있다.

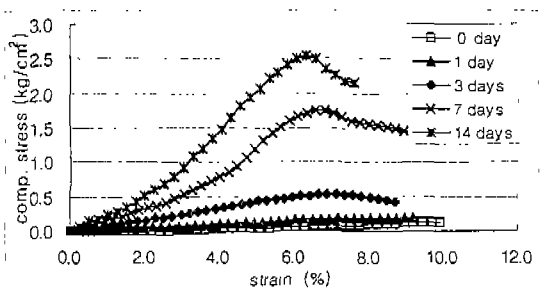

Fig.9 Stress-strain relationships for sludge.

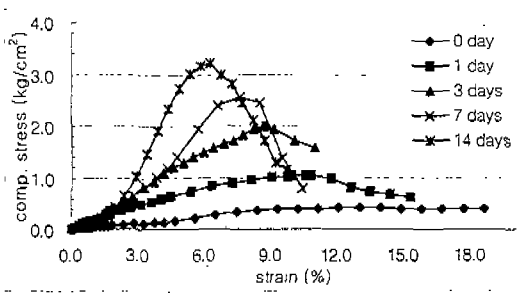

Fig.10 Stress-strain relationships for quicklime stabilized sludge.

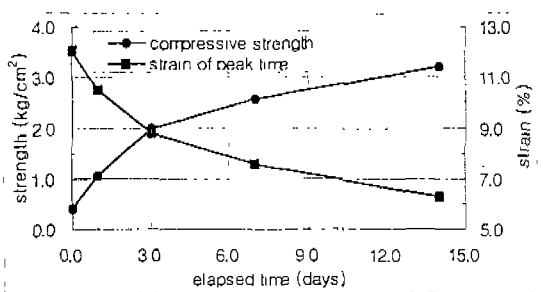

Fig.11 Copmressive strength and strain of peak time for quicklime stabilized sludge.

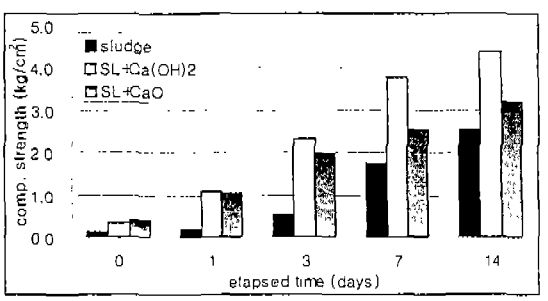

Fig.12 Compressive strength of sludge and stabilized sludges.

Ⅳ. 결 론

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

1. 슬러지의 안정화에 필요한 첨가량은 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 워커빌리티 등 다짐특성이 매우 개선되는 것으로 나타났으며, 다짐측면에서는 생석회보다 소석회가 효과적인 것으로 나타났다.
4. 안정화 시료의 압축성은 슬러지보다 약 50 %정도 감소하는 것으로 나타났으며, 생석회로 처리한 시료의 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. 안정화에 따라 안정화된 시료의 투수계수는 슬러지에 비해 급격하게 감소하였으며, 정규화된 간극비와 투수계수는 대수관계를 나타내었다.
7. 슬러지의 안정화에 따라 압축강도는 약 26%~72%정도 개선되는 것으로 나타났으며, 재령에 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 성토재로서 사용은 어려우나 안정화 기법 또는 기타 첨가재의 추가 등으로 특성을 개선한다면 충분히 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 건설교통부, 1995, 폐기물 매립지 차수재 개발, 연구보고서 KICT/95-GE-1202, 한국건설 기술연구원, pp.295-300.
2. 김영한, 1992, 정수장 슬러지의 건설재료로서의 이용가능성에 관한 연구, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, pp.51-59.
3. 김인배, 1994, 하수슬러지의 시멘트계 고형화에 의한 유효이용에 관한 연구, 중앙대학교 대학원 박사학위 논문, pp.13-34.
4. 박순원, 1991, 하수슬러지와 정화조 폐액의 토지주입에 관한 연구, 고려대학교 대학원 박사학위논문, pp.33-41.
5. 조홍재, 1994, 안정화시킨 도시 하수 슬러지의 매립지 복토재 및 차수재 활용 가능성, 강원대학교 대학원 석사학위 논문, pp.15-27.
6. Alleman, J. E. and A. B. Neil, 1984, Constructive sludge management : Biobrick, J. of environmental engineering div., ASCE 110(2), pp.301-311.
7. Berry, P.L. and T. J. Poskitt, 1972, The consolidation of peat, Geotechnique 22(1), pp.27-52.
8. Diniel, D. E., 1993, Geotechnical practice for waste disposal, Chapman & Hall, pp.683-690.
9. Kamon, M. and S. Nontanannandh, 1991, Combining induatrial wastes with lime for soil stabilization, J. of Geotech. Engrg. div., ASCE 117(1), pp.1-17.
10. 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.