

폐기물 매립지의 복토재로 엔지니어드스톤 슬러지의 활용에 관한 연구

A Study on Cover Material of Waste Landfill with Engineered Stone Sludge

김 영 태¹⁾ · 안 광 국[†] · 강 흥 식²⁾

Youngtae Kim · Kwangkuk Ahn · Hongsig Kang

Received: May 6th, 2022; Revised: May 23rd, 2022; Accepted: June 21st, 2022

ABSTRACT : The industrial waste is becoming a big problem in the aspect of spatial and environmental in domestic and international. Therefore, the waste reduction and recycling policy has been being implemented as a way to solve this problem. The engineered stone sludge, which is waste, is generated during the engineered stone production process. since engineered stone sludge is mostly treated by landfill, an increase in the amount of the sludge leads to an increase in landfill sites and treatment costs. therefore, there is a need for a method of resourcization with engineered stone sludge. So, laboratory tests (Plastic and liquid limits, compaction, unconfined compression and permeability test) were conducted to confirm the possibility of using engineered stone sludge mixed with weathered granite soil as a cover material for landfill in this study. The result shows that the mixed soil material with less than 62.5% of engineered stone sludge can be used as a cover material for landfill.

Keywords : Engineered stone, Sludge, Waste landfill, Cover material

요 지 : 산업폐기물은 국내외적으로 공간 및 환경적 측면에서 큰 문제가 되고 있다. 따라서 이를 해결하려는 방법으로 폐기물 감량화 및 재활용 정책이 실시되고 있다. 산업폐기물인 엔지니어드스톤 슬러지는 엔지니어드스톤 생산 과정에서 발생한다. 엔지니어드스톤 슬러지는 대부분 매립으로 처리되기 때문에 발생량 증가는 매립공간 및 처리비용을 증가시킨다. 그러므로 엔지니어드스톤 슬러지를 자원화시킬 수 있는 방법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 엔지니어드스톤 슬러지에 화강풍화토를 혼합한 혼합 복토재를 매립지의 복토재로서 활용 가능성을 확인하기 위한 목적으로 실내시험(액소성시험, 다짐시험, 일축압축시험, 투수시험)을 수행하였다. 그 결과 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 62.5% 미만인 엔지니어드스톤 슬러지 혼합 복토재가 매립지의 복토재로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 엔지니어드스톤, 슬러지, 폐기물 매립지, 복토재

1. 서 론

산업의 성장과 더불어 발생하는 부산물인 산업폐기물은 국내외적으로 공간 및 환경적 측면에서 큰 문제가 되고 있다. 이러한 문제를 해결하려는 방법으로 소극적으로는 산업폐기물의 감량화 정책이 시행되고 있으며, 적극적으로는 산업폐기물의 재활용 정책이 시행되고 있다.

산업폐기물을 재활용하여 자원화하기 위하여 Gidley와 Sack(1984)은 건설 분야에 응용할 수 있는 다양한 방법을 제시한 후 산업폐기물을 재활용하기 위한 다양한 연구가 수행되었다(Bowers et al., 1987; Kamon et al., 1988; Dhir et al., 1988; Mehta, 1985; Dhir et al., 1988; Duda, 1987). 국내에서 산업폐기물 중 슬러지를 자원화하여 건설 분야에 응용

하기 위한 연구는 하·폐수슬러지 및 석분슬러지를 이용한 연구가 수행되었다(Ki et al., 1987; Kim et al., 2015; Kim et al., 1995; Nam et al., 2005).

주거용 및 건축자재용 등 산업 전 분야에 다양하게 사용되고 있는 인조대리석인 엔지니어드스톤은 95% 이상이 석영으로 구성되어 있어 친환경적이고, 천연대리석에 비해 내구성 및 내화학성, 내오염성 등 모든 물성을 능가하는 장점과 천연대리석에 비해 가격이 저렴한 장점이 있어 천연대리석을 대신하는 차세대 인조대리석으로 다양한 산업분야에 사용되고 있다. 이러한 인조대리석인 엔지니어드스톤의 글로벌 성장률은 2019년에서 2024년까지 약 7.5%의 연평균 성장률을 예측하고 있다. 엔지니어드스톤 성장률 증가에 따른 생산량 증가와 더불어 엔지니어드스톤 생산과정에서 발생

1) Executive Director, Seohyun Engineering Co., LTD

† Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : akk@cbnu.ac.kr)

2) Director of Research, Byeokdong Construction Co., LTD

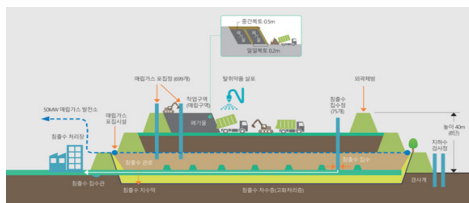
되는 부산물인 엔지니어드스톤 슬러지의 증가는 엔지니어드스톤 슬러지를 처리하기 위한 공간 및 비용을 증가시키게 될 것이다. 따라서 이러한 문제를 해결하고자 엔지니어드스톤 슬러지를 재활용하여 자원화 시킬 수 있는 방법이 필요하다.

이에 본 연구에서는 엔지니어드스톤 슬러지를 자원화하여 재활용할 수 있는 방법으로 매립지의 복토재를 고려하였다. 엔지니어드스톤 슬러지를 매립지의 복토재로 활용할 수 있는 가능성을 확인하기 위해 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」을 고려해 엔지니어드스톤 슬러지와 화강풍화토를 혼합한 혼합 복토재의 지반공학적 특성을 확인하고 매립지의 복토재로 활용할 수 있는 가능성을 확인하기 위한 목적으로 실내시험을 수행하였다.

2. 폐기를 매립지의 복토재

2.1 폐기물 매립지 내 복토

매립지 내 폐기물 매립은 Fig. 1과 같이 폐기물을 매립지 내에 펼친 후 다짐을 수행하고 폐기물 위에 양질의 흙을 덮는 복토 작업이 수행된다. 복토 작업은 크게 일일복토, 중간복토, 최종복토로 구분된다. 일일복토는 하루의 매립작업이 완료된 후 폐기물층 표면에 흙을 덮는 과정이며, 중간복토는 일일복토와는 별도로 폐기물 운반차의 통로 지반 조성을 목적으로 수행된다. 그리고 최종복토는 매립지의 경관 향상과 매립 후 토지 이용 등을 고려하여 수행하게 된다.



(a) Waste landfill site



(b) Spread of waste



(c) Compaction of waste



(d) Compaction of cover soil

Fig. 1. Waste landfill site (Sudokwon landfill site management corporation)

2.2 매립지의 복토재 요구기준

매립지 복토재의 재료적 요구기준은 국내 폐기물관리법, 동법시행령, 시행규칙(2021)에 명확하게 기준이 제시되어

Table 1. Criteria of cover material in landfill

Classification		Criteria
Liquid limit	Banking materials	under 50%
Plastic index		under 25%
Max. dry unit weight		more than 1.5t/m ³
Unconfined compressive strength	Running stability	more than 0.5kg/cm ²
	Banking materials	more than 1.5kg/cm ²
Coefficient of permeability	General, city waste	not more than 5.0×10 ⁻⁵ cm/sec
	Sudokwon landfill site	1.0×10 ⁻² cm/sec~1.0×10 ⁻⁵ cm/sec

있지 않다. 그러나 산업폐기물을 매립지의 복토재로 재활용하기 위한 다양한 연구(Jeong, 2005; Yea, 2009; Lee, 2013)에서 고려한 매립지 복토재의 요구기준은 Table 1과 같다.

3. 실험방법 및 내용

산업폐기물로 분류되는 엔지니어드스톤 슬러지를 매립지의 복토재로 재활용하기 위해 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」을 고려해 일반토사류인 화강풍화토와 엔지니어드스톤 슬러지를 혼합한 혼합 복토재의 지반공학적 특성을 확인하기 위해 실내시험을 수행하였다.

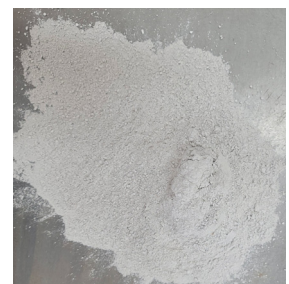
3.1 혼합 복토재

혼합 복토재를 구성하는 화강풍화토(Fig. 2a)는 통일분류법에 따라 분류되는 입도분포가 나쁜 모래(SP)를 엔지니어드스톤 슬러지(Fig. 2b)는 압축성이 낮은 실트(ML)를 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 화강풍화토와 엔지니어드스톤 슬러지의 입도분포 및 물리적 특성은 Fig. 3~4 및 Table 2~3과 같다. 혼합 복토재를 구성하는 화강풍화토와 엔지니어드스톤 슬러지는 110°C의 건조로를 이용해 완전히 건조한 교란된 상태의 시료를 사용하였다.

화강풍화토와 엔지니어드스톤 슬러지를 혼합한 혼합



(a) Weathered granite soil



(b) Engineered stone sludge

Fig. 2. Mixed cover material

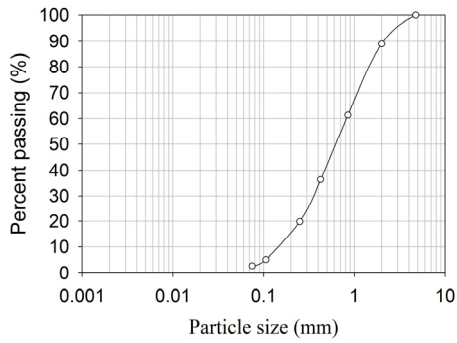


Fig. 3. Grain size distribution curve of weathered granite soil

Table 2. Physical properties of weathered granite soil

Classification	Value
Specific gravity (Gs)	2.26
Effective grain size (D10, mm)	0.146
coefficient of curvature (Cu)	5.52
uniformity coefficient (Cg)	1.08
Liquid limit (LL, %)	NP
Plastic limit (PL, %)	NP
USCS	SP

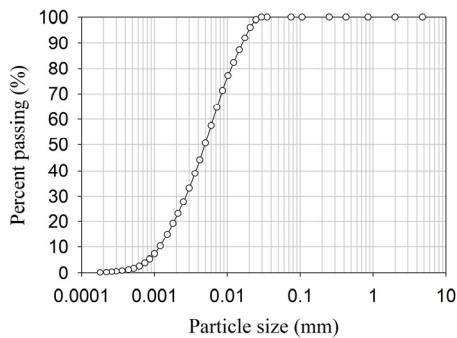


Fig. 4. Grain size distribution curve of engineered stone sludge

Table 3. Physical properties of engineered stone sludge

Classification	Value
Specific gravity (Gs)	2.26
Effective grain size (D10, mm)	0.0017
coefficient of curvature (Cu)	5.36
uniformity coefficient (Cg)	0.95
Liquid limit (LL, %)	36.05
Plastic limit (PL, %)	31.92
USCS	ML

복토재는 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 0%, 12.5%, 25.0%, 37.5%, 50.0%, 62.5%, 75.0%, 87.5%, 100%가 되도록 Table 4와 같은 중량비로 혼합·조성하여 실내시험에 적용하였다.

Table 4. Mixing cover material

Classification	Mixing ratio by weight		Content of engineered stone sludge (%)
	Weather granite soil	Engineered stone sludge	
T1	1	0	0
T2	1	0.14	12.5
T3	1	0.33	25.0
T4	1	0.60	37.5
T5	1	1.00	50.0
T6	1	1.67	62.5
T7	1	3.00	75.0
T8	1	7.00	87.5
T9	0	1	100.0

3.2 실내 시험

혼합 복토재의 지반공학적 특성을 확인하기 위한 실내시험은 매립지 복토재 요구기준인 Table 1을 고려하여 액·소성한계시험, 다짐시험, 일축압축시험, 투수시험을 수행하였으며, Table 5와 같이 한국산업표준에 규정된 시험방법으로 Fig. 5와 같이 수행하였다.

Table 5. Laboratory test of Korean industrial standard

Classification	Korean industrial standard
Liquid and Plastic limit	KS F 2303/2304
Compaction test	KS F 2312
Unconfined compression test	KS F 2314
permeability test	KS F 2322



(a) Liquid and Plastic limit test (b) Compaction test (c) Unconfined compression test (d) Permeability test

Fig. 5. Laboratory test

4. 결과 분석

4.1 연경도 특성

세립토의 함유량은 흙의 성질을 변화시킬 수 있다. 세립토로 분류되는 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량에 따른 혼합

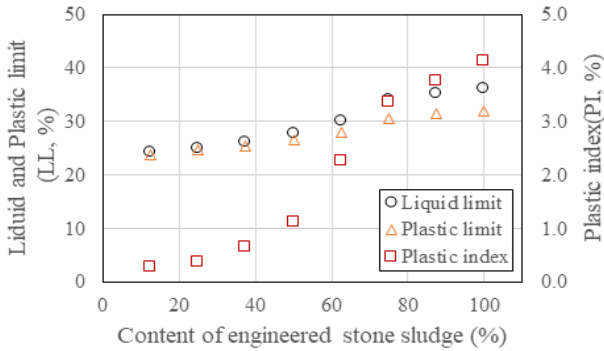


Fig. 6. Liquid and plastic limit and plastic index

복토재의 성질 변화를 확인하기 위한 액성한계 및 소성한계, 소성지수는 Fig. 6과 같이 나타났다.

엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따라 Fig. 6과 같이 액성한계는 3.55~48.97% 증가하는 것으로 나타났으며, 소성한계는 3.17~3.46% 증가하는 것으로 나타났다. 소성지수는 압축성을 나타내는 지수로 엔지니어드스톤 슬러지 함유량이 증가함에 따라 1.36~14.67배 증가하는 것으로 나타났다. 이는 엔지니어드스톤 슬러지에 흡착되는 수분에 의한 영향으로 보인다.

그리고 매립지의 복토재로 활용하기 위한 요구기준인 액성한계 50% 이하 및 소성지수 25% 이하를 엔지니어드스톤 슬러지를 함유한 모든 혼합 복토재가 만족하는 것으로 확인됨에 따라 엔지니어드스톤 슬러지를 함유한 혼합 복토재를 매립지의 복토재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 다짐 특성

다짐은 느슨한 지반을 다져 흙의 밀도를 높혀 지반의 강도 및 압축성, 투수성을 개선시키는 방법으로 엔지니어드스톤 슬러지 함유량에 따른 혼합 복토재의 다짐곡선 및 최적 함수비, 최대건조단위중량은 Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 나타났다.

Fig. 8과 같이 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따라 최적함수비는 1.06~131.94% 증가하고 최대건조단위중량은 0.74~32.3% 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 엔지니어드스톤 슬러지에 흡착되는 수분에 의한 영향 때문으로 보인다.

그리고 매립지의 복토재로 활용하기 위한 요구기준인 최대건조단위중량 1.5ton/m^3 이상을 엔지니어드스톤 슬러지 함유량이 62.5% 이하의 혼합 복토재가 만족하는 것으로 확인됨에 따라 매립지 복토재로 활용하기 위한 혼합 복토재는 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 62.5% 이하인 혼합 복토재가 매립지 복토재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

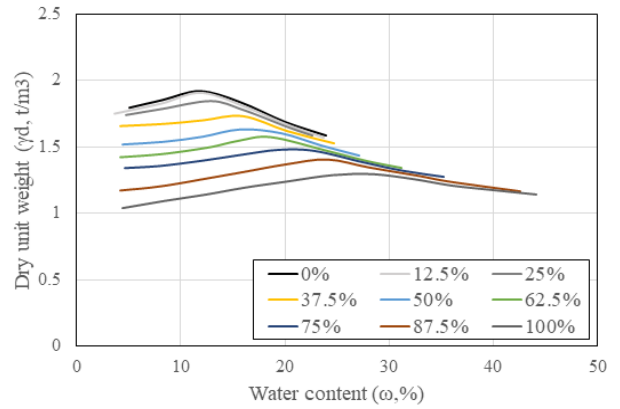


Fig. 7. Compaction curve

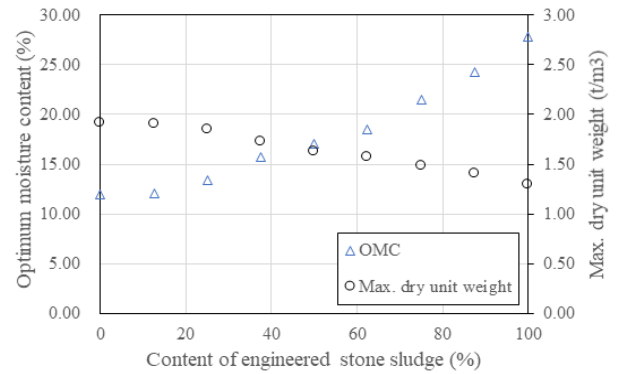


Fig. 8. OMC and Max. dry unit weight

그러므로 강도 및 투수성에 관한 일축압축강도시험과 투수 시험은 엔지니어드스톤 슬러지 함유량이 62.5% 이하의 경우만을 고려하여 수행하였다.

4.3 일축압축강도 특성

매립 시공을 고려한 매립장비의 주행 안정성 및 매립지반의 안정성을 검토하기 위한 일축압축강도는 1일차, 3일차 및 7일차 일축압축강도를 확인하였다. 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량은 다짐 조건을 고려하여 62.5% 이하인 혼합 복토재를 고려하였으며, 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량에 따른 일축압축강도는 Fig. 9와 같이 나타났다.

일일복토 시 매립 장비의 주행 안정성을 검토하기 위한 1일차 일축압축강도는 Fig. 9와 같이 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따라 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 50%까지는 2.24~3.84배 증가하다 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 50% 이후는 15.82% 감소하는 것으로 나타났으며, 폐기물 매립 시 운영되는 매립 장비에 대한 주행 안정성을 검토하기 위한 3일차 일축압축강도는 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따라 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 37.5%까지는 1.29~1.89배 증가하다

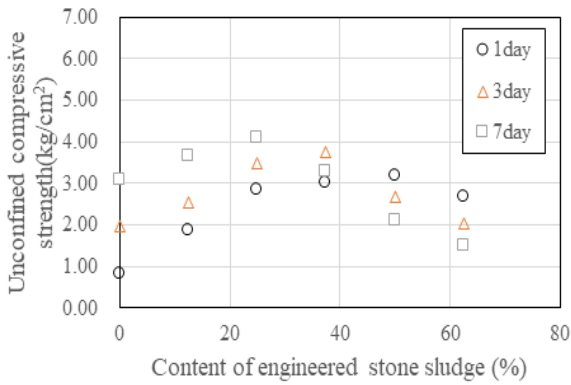


Fig. 9. Unconfined compressive strength vs Content of engineered stone sludge

엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 37.5% 이후는 28.57~45.45% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 폐기물 매립 후 중간 복토 시공 시 매립 장비의 주행 안정성 및 매립지반의 안정성을 검토하기 위한 7일차 일축압축강도는 Fig. 8과 같이 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따라 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 25.0%까지는 1.84~2.06배 증가하다 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 25.0% 이후는 19.92~63.35% 감소하는 것으로 나타났다. 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 및 매립 시공 조건에 따른 일축압축강도의 변화는 엔지니어드스톤 슬러지에 흡착되는 수분에 의한 전기적 인장력 및 반발력과 매립 시공 조건에 따른 수분 감소에 의한 영향으로 보인다.

매립지의 복토재로 활용하기 위한 요구기준인 일축압축강도 0.5 및 1.5kg/cm² 이상을 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 62.5% 미만인 혼합 복토재가 만족하는 것으로 확인됨에 따라 매립지의 복토재로 활용하기 위한 혼합 복토재는 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 62.5% 미만인 혼합 복토재가 매립지 복토재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 투수 특성

강우의 침투는 폐기물 매립지 내 침출수를 증가시킬 수 있다. 매립지반의 침투성을 검토하기 위한 투수계수는 매립 시공을 고려하여 1일차, 3일차 및 7일차 투수계수를 확인하였으며, 엔지니어드스톤 슬러지를 활용한 혼합 복토재는 일축압축강도와 동일하게 다짐 조건을 고려해 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 62.5% 이하의 혼합 복토재를 고려하였다. 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량에 따른 혼합 복토재의 투수계수는 Fig. 10과 같이 나타났다.

일일복토 시공 후 강우에 따른 혼합 복토재의 투수성을 검토하기 위한 1일차 투수계수는 Fig. 10과 같이 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따라 엔지니어드스톤 슬러지의

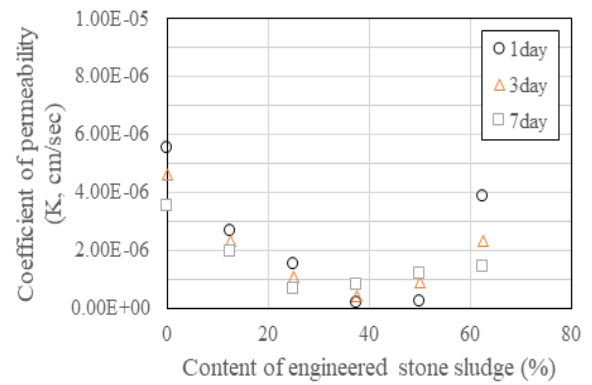


Fig. 10. Coefficient of permeability vs Content of engineered stone sludge

함유량이 50.0%까지는 52.16~96.25% 감소하다 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 50.0% 이후 16.14배 증가하는 것으로 나타났으며, 폐기물 매립 후 혼합 복토재의 투수성을 검토하기 위한 3일차 투수계수는 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따라 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 37.5%까지는 49.97~91.04% 감소하다 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 37.5% 이후 2.12~5.66배 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 중간복토 시공 후 강우에 따른 혼합 복토재의 투수성을 검토하기 위한 7일차 투수계수는 Fig. 10과 같이 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따라 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 25.0%까지는 45.35~80.91% 감소하다 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 25.0% 이후 1.19~2.12배 증가하는 것으로 나타났다. 일축압축강도와 유사하게 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 및 매립 시공 조건에 따른 투수계수의 변화는 엔지니어드스톤 슬러지에 흡착되는 수분에 의한 전기적 인장력 및 반발력과 매립시공 조건에 따른 수분 감소에 의한 영향으로 보인다.

매립지의 복토재로 활용하기 위한 요구기준인 투수계수 1.0×10^{-5} cm/sec 이하를 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 62.5% 이하인 혼합 복토재 모두 만족하는 것으로 확인됨에 따라 매립지의 복토재로 활용하기 위한 혼합 복토재는 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 62.5% 이하인 혼합 복토재가 매립지 복토재로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

산업폐기물인 엔지니어드스톤 슬러지를 매립지의 복토재로 재활용 가능성을 확인하기 위한 위해 「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」을 고려해 엔지니어드스톤 슬러지와 화강풍화토를 혼합한 혼합 복토재의 지반공학적 특성을 확인하기 위하여 실내시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량 증가에 따른 혼합 복토재의 액소성한계 및 소성지수, 최적함수비는 증가하는 것으로 나타났으며, 최대건조단위중량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 엔지니어드스톤 슬러지에 흡착된 수분에 의한 영향으로 보인다.
- (2) 혼합 복토재를 구성하는 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하다 감소하는 것으로 나타났으며, 투수계수는 일축압축강도와 반대로 감소하다 증가하는 것으로 나타났다. 이는 엔지니어드스톤 슬러지에 흡착된 수분에 의한 전기력과 매립 시공 조건에 의한 수분 감소에 의한 영향으로 보인다.
- (3) 매립지의 복토재로 엔지니어드스톤 슬러지를 함유한 혼합 복토재의 활용 가능성은 엔지니어드스톤 슬러지의 함유량이 62.5% 미만인 혼합 복토재가 매립지 복토재의 요구 기준인 액성한계 및 소성지수, 최대건조밀도, 일축압축강도, 투수계수 모두를 만족하는 것으로 확인됨에 따라 매립지의 복토재로 혼합 복토재를 활용할 수 있는 것으로 판단된다.
- (4) 그러므로 추후 실제 현장에 적용성을 확인하기 위한 현장 적용성 연구 및 경제성 평가가 추가로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

1. Bowders, J. J. Usmen, M. A. and Gidley, J. S. (1987), Stabilized fly ash for use as low-permeability barriers. Geotechnical practice for waste disposal, Geotechnical special publication (13), pp. 320~333.
2. Dhir, R. K., Hubbard, F. H., Munday, J. G. L., Jones, M. R. and Duerden, S. L. (1988), Contribution of PFA to Concrete Workability and Strength Development, Cement and Concrete Research, Vol. 18, pp. 277~289.
3. Duda, A. (1987), Aspects of the Sulfate Resistance of Steelwork Slag Cement, Cement and Concrete Research, Vol. 17, pp. 373~384
4. Gidley, J. S. and Sack, W. A. (1984), Environmental Aspects of Waste Utilization in construction, Journal of environmental engineering, volume 110, issue 6, pp. 117~1133.
5. Jeong, J. O. (2005), A Study on Geotechnical Properties of Sewage Dredged Soil and Stone Dust for Construction Fill Material, Master's thesis, Dongguk University, pp. 11~20 (in Korea).
6. Kamon, M., Tomohisa, S., Tsubouchi, K., and Nontanandh, S. (1988), Reutilization of Waste Concrete Powder by Cement Hardening, Journal of the Japanese Society of Material Sciences, Vol. 37, No. 422, pp. 1260~1265.
7. Ki, M. B., Lee, S. H. and Kim, S.S. (1987), A Study on the Binding of Municipal Sewage Sludges with Cement Binders, Journal of the Korea Society of Waste Management, Vol. 4, No. 1, pp.37-51 (in Korea).
8. Kim, I. B., Lee, H. J. and Ki, M. B. (1995), Cement Solidification of Dewatered Sludge for Reuse, Journal of the Korea society of waste management, Vol. 12, No. 2, pp. 167~173 (in Korea).
9. Kim, K. Y., Lee, K. I., Yun, J. M., Song, Y. S. and Kim, T. H. (2015), Permeability Characteristics of Soils Mixed with Powdered Sludge of Basalt, Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 14, No. 2, pp. 89~94 (In Korea).
10. Lee, C. H. (2013), Evaluation of Possible use as a landfill cover soil by solidification processing of wastewater sludge, Master's thesis, Chung-nam National University, pp. 7~11 (in Korea).
11. Mehta, P. K. (1985), Influence of Fly Ash Characteristics on the Strength of Portland-Fly Ash Mixtures, Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp. 669~674.
12. Nam, J. M., Yun, J. M., Kim, K. Y. and Kim, K. I. (2005), A study on suitability of powdered basalt sludge for liner, Journal of the Korea society of waste management, Vol. 22, No. 5, pp. 464~471 (in Korea).
13. Yea, U. P. (2009), A Feasibility Study of the Coal Mine Drainage Sludge as a Recycling Middle Landfill Cover and Broad Line Materials, Ph D. dissertation, Engineering Korea University, pp. 6~22 (in Korea).