

# 정수슬러지 혼합토의 함수특성곡선과 불포화 투수 특성

## Characteristics of Soil-Water Characteristic Curve and Unsaturated Permeability of Sludge Mixture

임 병 권<sup>1</sup>     Lim, Byung-Gwon

김 윤 태<sup>2</sup>     Kim, Yun-Tae

### Abstract

In this paper, in order to solve high water content of water sludge and promote its recycle, sludge mixtures with various mixing ratios were produced. Sludge mixture consisted of water sludge and weathered granite soil. Their physical properties and unsaturated characteristics (soil-water characteristic curve, and unsaturated permeability function) were investigated by laboratory tests. Experimental test results indicated that at a given matric suction volumetric water content of sludge mixture increased as water sludge content increased. Air entry values of sludge mixture increased from 0.9 kPa to 2.4 kPa with an increase in water sludge content or fine content. In addition, unsaturated permeability function, which is an important factor for performing infiltration analysis, was predicted using saturated permeability and soil-water characteristic curve of sludge mixture.

### 요 지

본 논문에서는 정수슬러지의 고함수비 문제를 해결하고 재활용을 촉진하기 위해 정수슬러지와 화강풍화토를 다양한 배합비로 혼합하여 슬러지혼합토(sludge mixture)를 제작하고, 다양한 실내 시험을 통해 슬러지혼합토의 물리적 특성과 불포화 특성을 분석하였다. 시험 결과, 정수슬러지 함량이 증가함에 따라 동일한 모관흡수력에 대응하는 체적 함수비는 증가하였다. 또한 정수슬러지 함량 또는 세립분 함량이 증가함에 따라 공기함입치는 0.9kPa에서 2.4kPa로 증가하였다. 슬러지혼합토의 포화투수계수 값과 함수특성곡선의 결과를 활용하여 강우 시 침투해석을 수행하는데 있어서 중요한 인자인 불포화 투수함수를 산정하였다.

**Keywords :** Sludge mixture, Soil-water characteristic curve, Unsaturated permeability function, Water sludge

### 1. 서 론

최근 산업발달과 인구집중으로 인해 도시폐기물이나 산업폐기물의 발생량이 매년 증가하고 있다. 이에 폐기물 처리가 사회적 문제로 대두됨에 따라 폐기물을 건설

재료로 재활용하는 것은 세계적인 추세이다. 국내에서도 환경부는 폐기물 감량과 재활용을 촉진하여 지속가능한 자원순환형 사회체계를 도모하기 위해 5년마다 재활용 기본계획을 수립해오고 있으나, 기술적인 부분과 인프라 구축 측면에서 미흡한 실정이다.

1 정희원, 부경대학교 해양공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ.)

2 정희원, 부경대학교 해양공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ., Tel. +82-51-629-6587, Fax. +82-51-629-6580, yunkim@pknu.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

2005년까지 정수장에서 수처리 과정중에 발생하는 정수슬러지(water sludge) 중 약 50% 정도는 해양투기 되었으나, 2007년 이후에 런던협약 발효로 인하여 해양투기가 금지되었다(MLTM, 2008). 이로 인해 정수슬러지의 재활용 용도 개발이 시급한 실정에 이르렀다.

정수슬러지는 하수슬러지(sewage sludge)에 비하여 유기물 함량이 적기 때문에 비료 등과 같은 농업적 유기재료로 재이용하기 힘들다. 그러나 슬러지의 주체인 무기성분은 토질분류상 점토에 가까운 성상을 갖고 있기 때문에 매립성토, 벽돌, 시멘트 등 건설재료로 활용하기 위한 연구가 국내외적으로 이루어지고 있다(Chung and Yu, 2006; Hwang et al., 2009; Sahin et al., 2008; Sales and Souza, 2009). 그러나 고함수비를 가지는 슬러지의 함수비를 저하시키지 않는 한 슬러지 자체만으로는 강도를 기대하기 어렵다(Chun et al., 1992). 이러한 슬러지의 고함수비와 같은 고질적인 문제를 저감하기 위하여 Kim et al.(2011)은 슬러지와 풍화토를 혼합하여 실험한 결과, 기본물성 및 강도 측면에서 정수슬러지가 건설재료로 활용가능함을 확인하였다. 또한 Yun et al.(2012)은 실내 실험을 통해 정수슬러지와 저회, 시멘트를 혼합한 정수슬러지 혼합토는 지반공학적으로 활용가능함을 보여 주었다.

Lee et al.(2003)과 Lee et al.(2005)은 도로 성토사면에 계측센서를 설치하여 함수비와 모관흡수력(음의 간극수압)을 지속적으로 계측함으로써 실제 성토사면이 불포화 상태임을 확인하였다. 따라서 정수슬러지를 사용한 혼합토가 교대 및 옹벽 뒤채움, 도로성토와 같은 건설재료로서 실제 지반에 적용될 경우, 초기 슬러지혼합토의 지반조건은 불포화 상태이다. 이러한 불포화된 지반 내에 강우 시 우수가 지반침투됨에 따라 지반의 함수비와 모관흡수력이 변하게 되고, 이에 따라 지반구조물의 안정성이 변하게 된다. 따라서 강우 지반 침투로 인해 유발되는 지반구조물의 안정성을 평가하기 위해서는 슬러지혼합토의 불포화 지반정수를 알아야 한다. 불포화토의 역학적 성질을 규명하기 위해 가장 필요한 기본적인 요소 중의 하나가 바로 함수특성곡선이다. 높은 함수비가 줄어들수록 흙 내부에 부의 간극수압이 작용한다. 이러한 부의 간극수압인 모관흡수력(matric suction)과 체적함수비(volumetric water content)의 상관관계를 나타내는 곡선이 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)이다. Rahardjo et al.(2011)은 구리찌꺼기, 페아스팔트에 대해 불포화 특성을 규명하는 실험을 하였으며, 폐재료

가 불포화적인 측면에서 넓은 범위로 활용되어야 함을 강조하였다. 현재까지 국내외적으로 풍화토의 불포화 특성을 규명하는 연구는 활발히 수행되었으나(Fredlund et al., 1994; Ryu, 2000; Lee et al., 2002; Shin et al., 2003; Kim et al., 2010), 슬러지혼합토의 불포화 지반 특성에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다.

본 논문에서는 정수슬러지의 고함수비 문제를 해결하고 재활용을 촉진하기 위해 슬러지와 화강풍화토를 혼합하여 슬러지혼합토(sludge mixture)를 제작하고, 이 슬러지혼합토의 불포화 특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 압력판 추출기(pressure plate extractor)를 사용하여 불포화 특성 중에서 가장 기본 자료인 함수특성곡선을 산정하였을 뿐만 아니라 기존의 함수특성곡선 경험식을 사용하여 맞춤변수를 구하였다. 또한 강우 시 침투해석을 수행하는데 있어서 중요한 인자인 불포화 투수함수를 산정하였다.

## 2. 실내실험

### 2.1 재료특성

정수장 슬러지의 입도는 원수의 성분이나 정수장의 운전 조건에 의존하나 일반적으로 입경  $5\mu\text{m}$  이하의 점토분을 50~80%,  $1\mu\text{m}$  이하의 콜로로이드분을 20~50%, 그리고 다량의 세립분을 함유하고 있다(Chung and Yu, 2006). 본 연구에서 사용된 정수슬러지는 부산광역시에서 운영하고 있는 한 정수장에서 채취한 시료로서 기계적 탈수과정을 거친 cake 형태이며, 초기 함수비는 약 448%이다.

Yu(2004)은 슬러지에 소성이 적고 압축성이 작은 재료를 혼합하면 토공재료로서 활용가치가 있다고 보고하였다. 화강풍화토는 모래 함량이 높아 소성이 적고 압축성이 작기 때문에 정수슬러지와 혼합하여 사용하기 적절하다. 본 논문에서는 조립질 함량이 높고 통일분류법 상 SW로 분류되는 부산시 동래지역에서 채취된 화강풍화토를 사용하여 정수슬러지의 고함수비 문제를 해결함과 동시에 역학적 특성을 개선하고자 하였다.

### 2.2 배합조건 및 물성실험

정수슬러지와 화강풍화토를 혼합하여 슬러지혼합토(sludge mixture: SM)를 제작하였다. 슬러지혼합토의 배

합비율은 Table 1과 같다. 화강풍화토 건조 무게를 기준으로 화강풍화토에 정수슬러지를 각각 10%, 30%, 50% 혼합하였다. 슬러지혼합토에 대해 다짐시험과 입도분포 시험을 수행하여 기존 건설재료로 많이 사용되는 화강 풍화토와 비교·분석하였다. Fig. 1(a)는 재료들의 입도분포를 나타낸다. 본 연구에 사용된 정수슬러지의 #200체 통과율은 약 40%이다. Fig. 1(b)는 슬러지혼합토의 다짐 시험 결과이다. 정수슬러지 함량이 증가할수록 세립분 함량은 커지며, 최적함수비는 증가하고 최대건조단위중량은 감소하는 경향을 보였다. 상대밀도가 95%일 때 슬러지혼합토의 건조단위중량은 12.3~16.5kN/m<sup>3</sup>의 범위로서 일반 성토재인 화강풍화토보다 단위중량이 작았다. 이것은 입자가 작고 경량성이 큰 정수슬러지의 영향인 것으로 사료된다. Table 2는 입도분포곡선으로부터 구한 입도 특성을 나타낸다. 슬러지혼합토는 통일분류

법 상 SW-SC로 분류되었다.

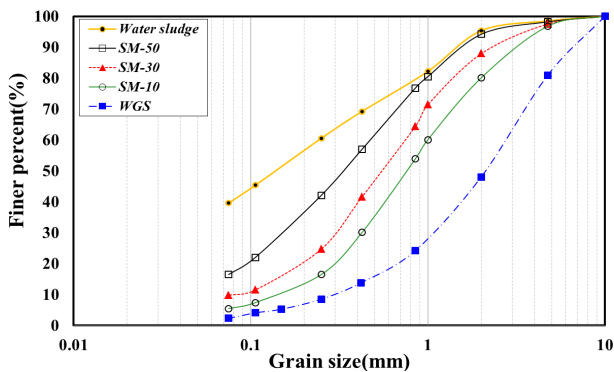
### 2.3 실험장비 및 실험방법

Fig. 2는 건조과정의 함수특성곡선을 구하기 위해서 사용된 압력판 추출 장비이다. 압력판 추출 장비는 셀에 가해진 압력에 따라 체적함수비의 변화를 측정하여 함수특성곡선을 구할 수 있다. 이 압력판 추출 장비는 5-bar의 세라믹디스크가 장착되어 있으므로 5-bar까지 모관흡수력을 적용할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 Lee et al.(2006)의 연구결과를 바탕으로 실제 사면에 존재하는 모관흡수력 분포를 200kPa 이하로 판단하고, 시료에 200kPa까지 모관흡수력을 적용하였다. 또한 축변환 기법을 적용하여 공기압만을 변화시키며 모관흡수력을 유발시켰으며, 24시간 주기로 압력단계를 변화시켜 주면

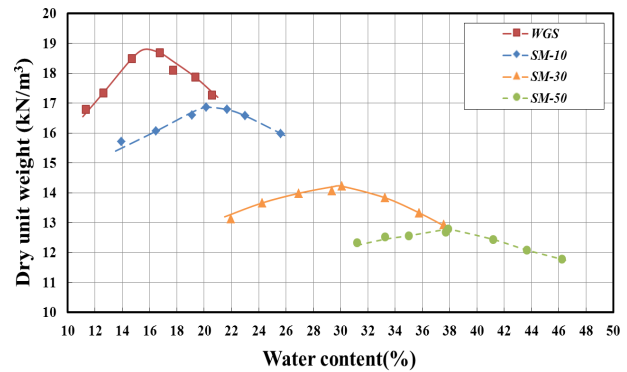
Table 1. Mixing ratio and mixing condition for sludge mixture

No.	Type	Symbol	$\gamma_d$ max	$\gamma_d$ min	$D_r$	$\gamma_{95}$	Porosity	Gs
1	Sludge Mixture (10%)	SM-10	16.80	12.01	95%	16.47	0.34	2.55
2	Sludge Mixture (30%)	SM-30	14.20	10.91	95%	13.99	0.42	2.44
3	Sludge Mixture (50%)	SM-50	12.50	9.23	95%	12.28	0.45	2.40
4	Weathered Granite Soil	WGS	18.70	11.93	95%	18.18	0.31	2.70

( $\gamma_d$  = Dry unit weight,  $\gamma_{95}$  = Dry unit weight at relative density of 95%,  $D_r$  = Relative density, Gs = Specific gravity)



(a) Grain-size distribution curve



(b) Compaction curve

Fig. 1. Grain-size distribution curve and compaction curve of sludge mixture

Table 2. Grain-size properties of sludge mixture and weathered granite soil

No.	Symbol	Gravel (%)	Sand (%)	Silt and Clay (%)	$D_{10}$	$D_{30}$	$D_{60}$	$C_u$	$C_c$	USCS
1	Water sludge	1.5	58.9	39.6	—	—	0.31	—	—	—
2	SM-10	3.2	91.3	5.5	0.13	0.42	1.11	8.54	1.22	SW-SC
3	SM-30	2.5	87.7	9.8	0.08	0.31	0.79	9.88	1.52	SW-SC
4	SM-50	1.8	81.7	16.5	—	0.16	0.49	—	—	—
5	WGS	19.1	78.6	2.3	0.30	1.18	2.80	9.33	1.66	SW

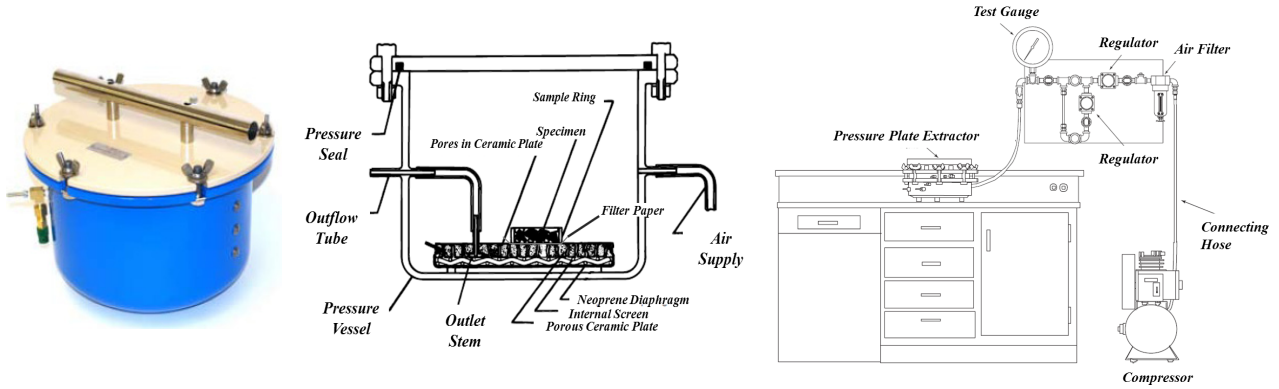


Fig. 2. Experimental apparatus and schematic diagram

서 실험하였다. 시료의 크기는 지름 5cm, 높이 1.5cm이다. 시료의 상대밀도는 95%이다.

불포화 투수함수는 실내실험으로 구하는 방법, 함수특성곡선으로부터 유추하는 방법, 토질변환함수인 Pedo-transfer function(PTF)을 사용하는 방법과 같이 크게 3가지로 나눌 수 있다. 함수특성곡선으로부터 유추하는 방법은 지반의 투수성과 다른 지반변수(함수특성곡선) 사이에 물리적 또는 경험적 관계를 규정하는 것이기 때문에 PTF 중의 하나로 볼 수 있다. 본 논문에서는 Fredlund et al.(1994)이 제안한 투수함수식을 사용하였기 때문에 함수특성곡선으로부터 유추한 투수함수식만 언급하였다.

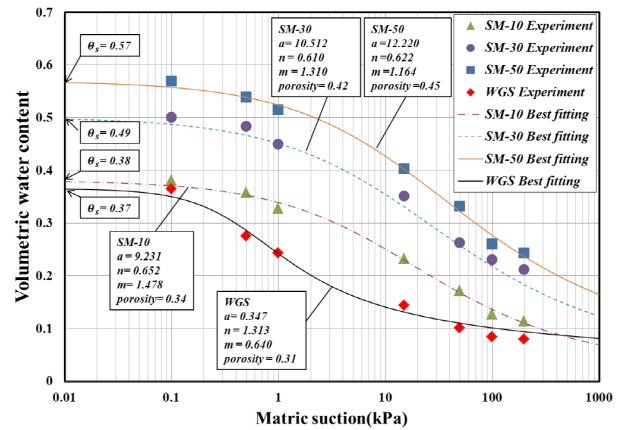


Fig. 3. Soil-water characteristic curve of sludge mixture

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 함수특성곡선

정수슬러지 함량에 따른 슬러지혼합토의 함수특성곡선 실험결과는 Fig. 3과 같다. 화강풍화토의 함수특성곡선보다 슬러지혼합토의 함수특성곡선이 위쪽에 존재한다. 또한 정수슬러지 함량이 증가함에 따라 동일한 모관흡수력에 대응하는 체적함수비는 증가한다. 이것은 슬러지에 포함된 세립분의 영향 때문이다. 포화체적함수비( $\theta_s$ )는 이론적으로 간극률과 같아야 하지만 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 전반적으로 포화체적함수비 값이 간극률보다 높게 측정이 되었다. 이러한 간극률과 포화체적함수비가 차이나는 원인은 흙의 유실을 막기 위해 사용한 여과지나 시료링에 흡착되어 있는 물의 무게 때문에 발생한 실험적 오차로 판단된다. 본 연구에서 사용된 압력판 추출 장비는 각 압력 단계마다 시료의 무게를 재어 체적함수비를 산정해야 한다. 그러나 시료링에 흡착된 물이나 포화된 여과지에 대한 정확한 환산기준이 없기

때문에 따로 보정하지 않았다. Fredlund et al.(1994)은 모관흡수력의 최대 제한값( $10^6$ kPa)을 고려하여 전체 모관흡수력 범위에 대하여 정확한 결과를 주는 함수특성곡선을 식 (1)과 같이 제안하였다. 본 논문에서는 식 (1)을 사용하여 슬러지혼합토의 실험 결과값을 피팅하였다.

$$\theta(\psi) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left(\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]\right)^m} \quad (1a)$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln\left[1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right]}{\ln\left[1 + \frac{1000000}{\psi_r}\right]} \quad (1b)$$

여기서  $\theta(\psi)$ 는 모관흡수력에 따른 함수특성곡선,  $\theta_s$ 는 포화체적함수비,  $a$ ,  $n$  및  $m$ 은 맞춤변수,  $e$ 는 자연수,  $C(\psi)$ 는 보정계수,  $\psi_r$ 은 잔류체적함수비에 대응하는 모관흡수력이다.

Table 3은 함수특성곡선의 실험 결과를 식 (1)에 적용

시켜 구한 맞춤변수(fitting parameter)를 정리해 놓은 것이다. 각각의 실험값에 따른 곡선 맞춤은 높은 모관흡수력의 범위에서는 잔류체적함수비( $\psi_r$ )의 가정에 따라 달라진다. Sillers and Fredlund(2001)는 대부분의 흙에서 잔류체적함수비에 대응하는 모관흡수력은 3000kPa 정도라고 보고하였다. 또한 Phoon(2010)은 실제 현장의 불포화조건에서의 모관흡수력 범위는 100kPa 이하이며, 이 범위에서는 잔류체적함수비의 가정에 따른 차이가 거의 없다고 하였다. 이러한 이유로 본 논문에서는 잔류체적함수비에 대응하는 모관흡수력을 3000kPa로 가정하여 맞춤변수를 구하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 정수슬러지 함량이 증가함에 따라 포화체적함수비( $\theta_s$ )와 맞춤변수 a 값은 증가하지만, 맞춤변수 m 값은 감소한다. 그러나 맞춤변수 n 값은 정수슬러지 함량에 관계없이 비슷한 값을 가졌다.

맞춤변수 뿐만 아니라 공기함입치 또한 불포화 특성 중에서 중요한 요인이다. Table 3에서 보인 바와 같이 슬러지혼합토의 공기함입치는 모두 0.9~2.4kPa 범위로 매우 작은 공기함입치를 가졌다. 통상적으로 점토 함량이 증가하면 공기함입치는 증가한다. Fig. 4는 정수슬러지 함량과 세립분 함량에 따른 공기함입치를 나타낸다. Fig. 4에서도 알 수 있듯이 입자가 작은 정수슬러지 함량이나 세립분 함량이 증가함에 따라 슬러지혼합토의 공기함입치는 각각 증가하였다.

### 3.2 불포화 투수함수

불포화 투수함수는 다양한 크기의 모관흡수력에 대해 실내투수시험을 수행하여 직접 얻는 것이 가장 합리적이지만, 시험에 소요되는 시간과 비용의 문제로 인해 일반적으로 함수특성곡선으로부터 추정하여 이용한다. 흔히 투수함수를 표현하기 위해서 식 (2)와 같이 상대투수계수(relative coefficient of permeability,  $k_r$ )을 사용한다. 모관흡수력에 의존하는 불포화 투수함수는 상대투수계수와 포화투수계수( $k_s$ )의 곱으로부터 구할 수 있다. 본 연구에서는 Fredlund et al.(1994)이 제안한 식 (3)을 사용하여 상대투수계수를 구하였다.

$$k_r = \frac{k(\psi)}{k_s} \quad (2)$$

$$k_r = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta_w(e^y) - \theta_w(\psi)}{e^y} \theta'_w(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_b)}^b \frac{\theta_w(e^y) - \theta_w(\psi)}{e^y} \theta'_w(e^y) dy} \quad (3)$$

여기서  $b = \ln(1,000,000)$ 이며,  $y$ 는 적분터미 변수를 의미한다. 본 논문에서는 슬러지혼합토와 화강풍화토의 포화투수계수를 구하기 위해 삼축투수시험 장비(ASTM D 5084-03)를 사용하여 포화투수계수 시험을 실시하였고,

Table 3. Fitting parameters for soil-water characteristic curve of sludge mixture

No.	Symbol	$\theta_s$	a (kPa)	n	m	Air entry value (kPa)
1	SM-10	0.381	9.231	0.652	1.478	0.89
2	SM-30	0.494	10.512	0.610	1.310	1.60
3	SM-50	0.570	12.220	0.622	1.164	2.39
4	WGS	0.365	0.347	1.313	0.640	0.15

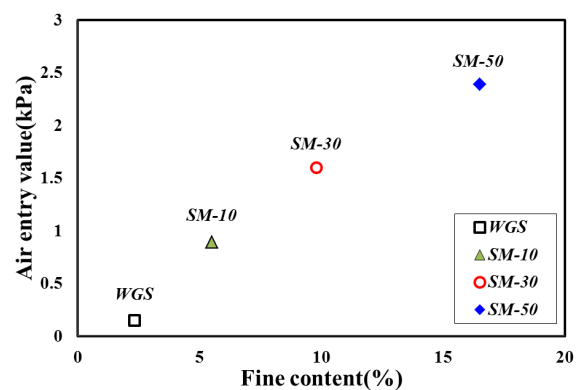
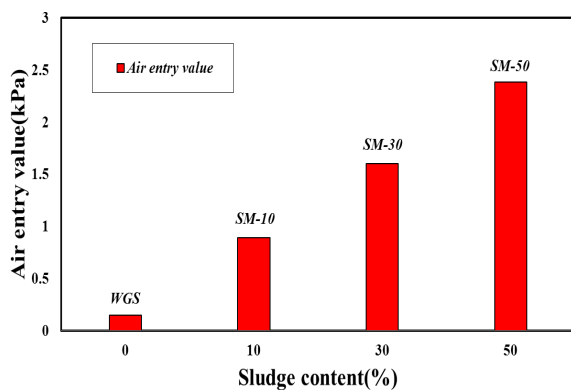


Fig. 4. Air entry value according to sludge contents and fine content

그 결과는 Table 4에 나타내었다. 정수슬러지 함량이 10%(SM-10)일 때의 포화투수계수는 화강풍화토보다 약 1.5배 감소하였고, 정수슬러지 함량이 50%(SM-50)일 때는 약 20배 가량 감소하였다.

Fig. 5는 세립분 함량에 따른 포화투수계수의 변화를 나타낸다. 세립분 함량이 약 2.5%인 화강풍화토의 투수계수는  $6.3 \times 10^{-7} \sim 5.9 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 의 범위에 있다(NDMI, 2010). 퇴적암 풍화토의 투수계수는 세립분 함량이 증가함에 따라 미소하게 감소하나(NDMI, 2011), 슬러지 혼합토의 투수계수는 세립분 함량이 증가할수록 급격히 작아졌다.

Table 4. Saturated permeability of sludge mixture

No.	Symbol	$k_s$ (m/s)	Permeability Test
1	SM-10	3.591E-06	Flexible Wall Permeameter Technique
2	SM-30	5.329E-07	
3	SM-50	2.720E-07	
4	WGS	5.942E-06	

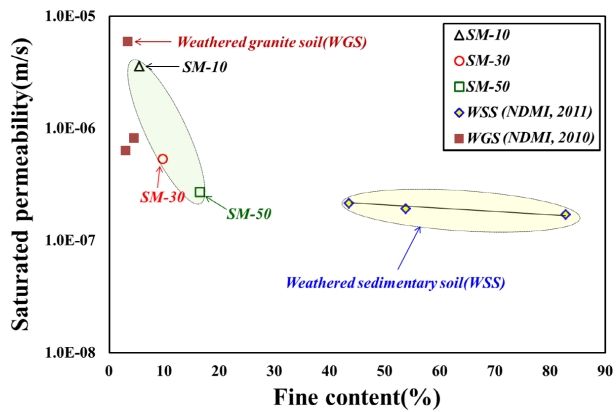
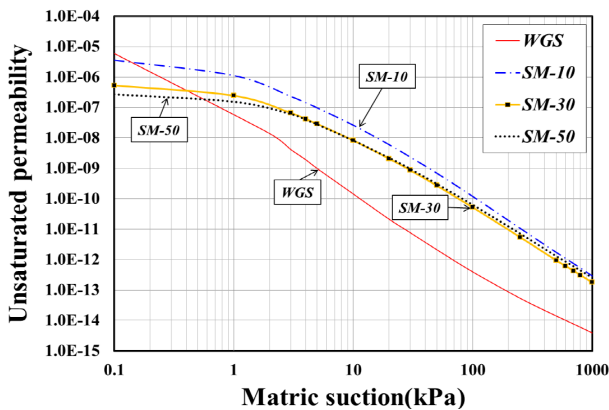


Fig. 5. Relationship between saturated permeability and fine content

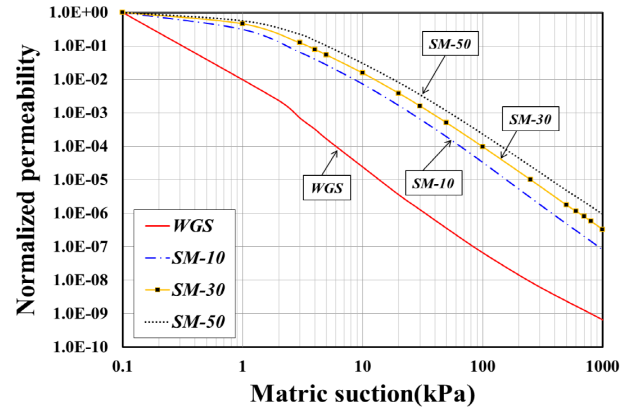


(a) Unsaturated permeability

Fig. 6(a)는 식 (3)을 사용하여 구한 모관흡수력의 변화에 따른 불포화 투수함수를 나타낸다. 슬러지혼합토보다 입자가 큰 화강풍화토는 작은 모관흡수력 값에서 더 큰 투수계수 값을 가진다. 그러나 모관흡수력이 증가함에 따라 화강풍화토의 불포화 투수함수는 급격히 감소한다. 모관흡수력이 약 1kPa 이상일 경우, 동일한 모관흡수력에 대응하는 화강풍화토의 투수계수는 슬러지혼합토의 투수계수보다 작아지는 경향을 보인다. 이것은 주어진 모관흡수력에서 슬러지혼합토가 더 많은 물을 보유하여 포화된 간극을 더 많이 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6(b)는 불포화 투수함수를 포화투수계수 값으로 정규화된 투수함수이다. 불포화 투수함수의 형태는 함수특성곡선의 공기함입치의 영향을 받게 된다. 슬러지혼합토의 함수특성곡선은 0.9~2.4kPa 범위의 공기함입치를 가지므로 이보다 더 높은 모관흡수력이 유발되어야 비로소 투수계수가 감소하는 특성을 보여주고 있다. 또한 정수슬러지 함량이 증가할수록 정규화된 투수함수는 위쪽으로 이동한다.

#### 4. 결론

폐재료인 정수슬러지를 건설재료로서 활용하고자 하였다. 폐재료가 건설재료로 실제 지반에 적용될 경우, 실제 지반조건은 불포화 상태이므로 설계 시 불포화 지반정수를 알아야 한다. 본 논문에서는 정수슬러지의 고함수비 문제를 해결하고 재활용을 촉진하기 위해 정수슬러지와 화강풍화토를 섞어 슬러지혼합토를 제작하였다. 정수슬러지 함량에 따른 슬러지혼합토의 함수특성곡선의 특성을 분석하였다. 또한 함수특성곡선을 바탕



(b) Normalized permeability

Fig. 6. Permeability function of sludge mixture obtained from soil-water characteristic curve

으로 불포화 투수함수를 유추하였다. 연구 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 슬러지혼합토의 함수특성곡선은 화강풍화토의 함수특성곡선보다 위쪽에 존재하며, 정수슬러지 함량이 증가함에 따라 증가된 세립분의 영향으로 동일한 모관흡수력에 대응하는 체적함수비는 증가한다.
- (2) 정수슬러지 함량이 증가함에 따라 맞춤변수  $a$  값은 증가하지만, 맞춤변수  $m$  값은 감소한다. 그러나 맞춤변수  $n$  값은 정수슬러지 함량에 관계없이 비슷한 값을 가진다.
- (3) 슬러지혼합토의 공기함입치는 0.9~2.4kPa 범위로서 정수슬러지 함량이나 세립분 함량이 증가함에 따라 공기함입치는 각각 증가한다.
- (4) 정수슬러지 함량이 증가할수록, 즉 정수슬러지에 포함된 세립분의 영향으로 포화투수계수는 감소한다.
- (5) 불포화 투수함수의 형태는 함수특성곡선의 공기함입치의 영향을 받으며, 슬러지혼합토의 공기함입치보다 더 높은 모관흡수력이 유발되어야 비로소 불포화 투수함수는 감소하는 특성을 보였다. 정수슬러지 함량이 증가함에 따라 정규화된 투수함수는 위쪽으로 이동한다.

## 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0007023)의 성과이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. ASTM (2003), "Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter", D 5084.
2. Chung, Y. I. and Yu, J. G. (2006), "Geotechnical Properties of Water Treatment Plant Sludge", *Journal of Water Science and Technology*, Vol.14, No.2, pp.17-25.
3. Chun, B. S., Kim, Y. H., and Oh, M. Y. (1992), "Geotechnical Characteristics of Water Sludge as construction material", *Korean Society of Civil Engineers(KSCE) Conference 1992, KSCE*, Vol.1992, No.1, pp.543-546.
4. Fredlund, D. G., Xing, A., and Huang, S. (1994), "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils using the Soil-Water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.533-546.
5. Hwang, H. U., Kim, J. H., and Kim, Y. J. (2009), "Recycling of Waterworks Sludge in Red Clay Bricks Manufacturing", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol.31, No.3, pp.217-222.
6. Kim, J. U., Kim, M. K., and Bae, W. S. (2011), "The Engineering characteristics of Sludge Mixed Soil", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.12, No.5, pp.43-50.
7. Kim, Y. K., Choi, K. L., Lee, S. J., Lee, S. R., and Kwon, H. S. (2010), "Estimation of Unsaturated Permeability Function from Water Retention Characteristics for Korean Weathered Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.26, No.10, pp.49-60.
8. Lee, I. M., Cho, W. S., Kim, Y. U., and Sung, S. G. (2003), "In-situ Monitoring of Matric Suctions in a Weathered Soil Slope", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.19, No.1, pp.41-49.
9. Lee, S. J., Lee, S. R., and Jang, B. S. (2002), "Unsaturated Shear Strength Characteristics of Weathered Granite Soils", *Journal of Korean Society of Civil Engineers (KSCE)*, Vol.22, No.1, pp.81-88.
10. Lee, S. R., Kim, Y. K., and Kwon, I. B. (2005), "Smart Measurement System for Rainfall Induced Unsaturated Soil Slopes Instability", *Korean Society of Civil Engineers (KSCE), Conference 2005, KSCE*, Vol.2005, No.10, pp.2899-2902.
11. Lee, S. R., Kim, Y. K., Choi, J. C., and Oh, J. K. (2006), "Measurements of Variation of Unsaturated Soil Properties in Compacted Road Slope due to Rainfall Infiltration", *Korean Society of Civil Engineers (KSCE), Conference 2006, KSCE*, Vol.2006, pp.1160-1163.
12. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs:MLTM (2008), <http://www.oceandumping.re.kr>
13. National Disaster Management Institute:NDMI (2010), "A study on Weighting Factors affecting Steep-slope Failure considering Rainfall Infiltration", pp.82-93.
14. National Disaster Management Institute:NDMI (2011), "Development of Steep-slope Risk Evaluation Model Considering Rainfall and Soil Infiltration Characteristics", pp.77-86.
15. Phoon, K. K., Santoso, A., and Quek, S. T. (2010), "Probabilistic Analysis of Soil-Water Characteristic Curves", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(3), pp.445-455.
16. Rahardjo, H., Vilayvong, K., and Leong, E. C. (2011), "Water Characteristic Curve of Recycled Materials", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.34, No.1, pp.89-96.
17. Ryu, C. H. (2000), "Measurements of Permeability Characteristics for Unsaturated Weathered Soils", *Journal of Korea Water Resources Association(KWRA)*, Vol.33, No.1, pp.133-142.
18. Sahin, U., Angin, I., and Kiziloglu, F. M. (2008), "Effect of Freezing and Thawing Processes on some Physical Properties of Saline-Sodic Soils mixed with Sewage Sludge or Fly ash", *Journal of Soil and Tillage Research*, Vol.99, pp.254-260.
19. Sales, A. and Souza, F. R. (2009), "Concretes and Mortars Recycled with Water Treatment Sludge and Construction and Demolition Rubble", *Journal of Construction and Building Materials*, Vol.23, pp.2362-2370.
20. Shin, B. W., Lee, B. J., Lee, J. K., and Kang, J. B. (2003), "Soil-Water Characteristics of Unsaturated Decomposed Granite Soils", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.4, No.1, pp.49-58.

21. Sillers, W. S. and Fredlund, D. G. (2001). "Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, pp.1297-1313.
22. Yu, J. G. (2004), "Engineering Characteristics of Water Sludge", *Kei-Myung University Graduate School*, pp.54-55.
23. Yun, D. H., Lee, B. H., and Kim, Y. T. (2012), "Strength and Leaching Characteristics of Water Sludge-added Lightweight Soil Considering Reinforcing Material and Layer", *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol.13, No.8, pp.75-84.

(접수일자 2012. 12. 10, 심사완료일 2013. 1. 25)