

폴리아크릴아마이드를 기반으로 하는 다기능성 토양안정제의 특성에 관한 연구

김진경 · 김대호* · 주상현* · 이명천†

동국대학교 화학공학과, *우영환경개발(주)
(2017년 10월 10일 접수, 2017년 10월 29일 심사, 2017년 12월 18일 채택)

Research on Characteristics of Multifunctional Soil Binder Based on Polyacrylamide

Jin Kyung Kim, Dae Ho Kim*, Sang Hyun Joo*, and Myung Cheon Lee†

Department of Chemical Engineering, Dongguk University, Seoul 04620 Korea

*Wooyoung Environment & Developmnet, Seoul 06753 Korea

(Received October 10, 2017; Revised October 29, 2017; Accepted December 18, 2017)

초 록

훼손된 비탈면을 효율적으로 복구하고 토양을 견고하게 지지하고 식물 생장을 도울 수 있는 토양바인더 사용이 매우 중요하다고 할 수 있다. 이러한 토양바인더는 토양을 오염시키지 않는 친환경 소재이면서 토양의 생태를 복원할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 토양바인더 외에 흡수제와 응집제를 첨가하여, 최적의 함수율, 투수계수, 직접전단강도 값을 갖는 조건을 도출하였다. 토양바인더로는 다양한 음이온강도의 polyacrylamide (PAM)를, 흡수제로는 super absorbent polymer (SAP), 응집제로는 cellulose ether (CE)를 사용하여 그 효과를 관찰하였다. 그 결과 우선 토양바인더를 사용한 경우 토양시험편의 직접전단강도와 함수율을 각각 수십 배 이상 그리고 두 배 이상 증가시킬 수 있었으며 변수인 투수계수를 낮춤으로 인해 방수의 효과가 증가함을 관찰되었다. 첨가제로서 SAP를 사용한 경우 그 효과를 더욱 높일 수 있었고 SAP의 응집력을 높이기 위해 첨가된 CE 역시 직접전단강도와 함수율을 높임을 관찰할 수 있었다.

Abstract

For the efficient recovering of collapsed sloped soil, using a soil binder that can support the soil strongly and help the growth of plants is very important. The soil binder should also have functions of recovering the soil ecologically as well as be environmental friendly materials. In this research, optimum values of the water content and permeability and direct shear strength were searched by adding the water absorbent and coagulant into the soil binder. The polyacrylamide (PAM) with various anionic strength, super absorbent polymer (SAP) and cellulose ether (CE) were used as a soil binder, water absorbent and coagulant, respectively. Effects of the soil binder on the characteristics of soil were observed by changing the mixing ratio of PAM, SAP and CE. Experimental results showed that the soil binder increased the direct shear strength tens of times and the water content around two times, whereas decreased the water permeability. Also, the addition of CE to increase the coagulation of SAP increased more of the direct shear strength and water content.

Keywords: polyacrylamide, soil binder, water contents, direct shear strength, variable head permeability

1. 서 론

우리나라 국토의 70%는 산악지형으로 이루어져 있어 국토개발이 이루어질 때에는 부득이하게 많은 면적의 비탈면이 발생하게 되는데, 표층의 토양이 훼손되어 침식이 일어나는 순간부터 비탈면 붕괴현상 등을 일으키며 심각한 문제가 발생하게 된다. 국내에서 비탈면 붕괴는 주로 7~8월의 우기 시 집중적으로 발생하며, 이로 인해 사면의 경사와 평지의 파괴가 발생한다고 한다. 또한, 최근 몇 년 사이에 집중 강우로 인한 산사태나 사면붕괴들은 토사의 침식이나 표층의 불안정

성으로 인해 발생하고 있다[1-5]. 따라서 훼손된 비탈면을 효율적으로 복구함과 동시에 생태적으로 복원하기 위해서는 토양을 견고하게 지지함과 동시에 식물의 생장을 도울 수 있는 적절한 토양바인더의 사용이 매우 중요하다고 할 수 있다. 국외에서는 1970~1980년대에 사면의 보강이나 연약지반 개량을 위해서 fly ash를 사용해 보강한 사례들이 많았으나, 환경오염이 문제가 되면서 사용량이 현저하게 줄어들었다. 최근 fly ash의 사용은 도로 노상토를 보강하는 사례로 발표되고 있지만, 여전히 중금속 누출로 배합량을 조절하면서 시공하고 있는 실정이다[6-7]. 일본에서는 많은 연구를 통하여 여러 토양안정제를 개발 활용하여 비탈면 붕괴 위험지역의 보강에 이용하고 효과도 얻고 있다[8].

토양바인더의 소재는 유기고분자 소재로써 다양한 기능을 요구하게 된다. 기본적인 기능은 첫째, 토양안정제가 사용되는 토양 환경은 많은 식물들이 자라고 있는 환경인 경우가 많기 때문에 식물의 생장을 도울 수 있으며 토양을 오염시키지 않는 친환경 소재여야 한다. 둘

† Corresponding Author: Dongguk University,
Department of Chemical Engineering, Seoul 04620 Korea
Tel: +82-2-2260-3366 e-mail: leemc@dongguk.edu

ISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 @ 2018 The Korean Society of Industrial and
Engineering Chemistry. All rights reserved.

Table 1. Type of Test Samples

specimen No.	샘플			
	soil	binder	additive1	additive2
1		×	×	×
2			×	×
3	H PAM	SAP		×
4			CE	
5	soil		×	×
6	cement	M PAM	SAP	×
7			CE	
8			×	×
9	L PAM	SAP		×
10			CE	

Table 2. Contents of the Binder and Additives in Soil Samples

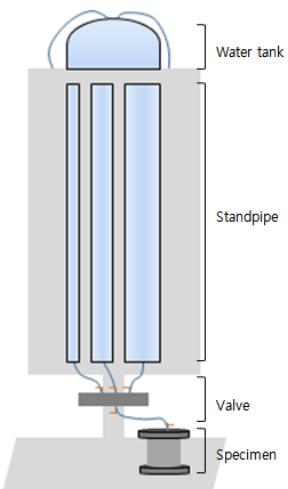
	Contents
Binder	1 wt% of soil
SAP	10 wt% of PAM
CE	1 wt% of PAM

째, 토양을 어떠한 환경에서도 견고하게 지지할 수 있어야 한다. 만약 토양이 지지력이 약하다면 쉽게 비탈면이 생기게 되어 훼손된 표층으로 인한 비산먼지가 발생하게 되고 심한 경우에는 비탈면 붕괴현상이 발생하게 된다. 세 번째, 다량의 수분침투를 방지할 수 있는 방수성이 있음과 동시에 다량의 수분에 의해 훼손되지 않아야 한다. 이와 같은 다양한 기능을 만족시키기 위해서는 친환경적이며 친수성이고 적절한 응집력을 갖춘 고분자 소재를 사용하는 것이 토양바인더로서 적합하고 할 수 있다.

Polyacrylamide (PAM)은 토양을 응집시켜 구조를 안정화시키는 토양바인더로서 많이 사용이 된다. 또한, 단일 토양입자들이 모여 하나의 단위체가 되는 입단 형성을 안정화시키는데 효과적이며 작물의 생육에 필요한 물과 알맞은 토양환경을 만들기 위해 필요한 물을 인공적으로 공급할 시의 투수율을 증가시키며 토양의 침식을 막는 효과를 갖고 있다. 그러므로 다양한 농업분야에도 사용되어 기축의 배설물, 다양한 침전물과 그 밖의 미생물을 걸러내는 데에도 이용이 된다[9-11].

일반적으로 PAM은 nonionic, cationic, anionic PAM이 있고, 이 중에서 anionic PAM이 토양 표면에 작은 토양 입자들이 얇은 층을 형성하는 토양 피막형성을 막는 역할을 한다고 알려져 있다. 토양에 피막이 형성이 되면 물의 투과성이 현저히 감소하게 된다. PAM처리가 되어있는 토양에 물이 흐르게 되면 응집제의 역할을 하는 PAM에 의해 토양의 입단이 형성되어 구조의 안정화가 이뤄지게 되어 침식과 이동을 방지할 수 있게 된다[12-13].

수분과 토양에 포함되어 있는 다가 무기양이온들이 토양 입자 주변의 전기적 이중층을 줄어들게 하여 토양 입자와 anionic PAM의 표면을 연결하는 bridge 역할을 하여 응집을 가능하게 한다[14-15]. PAM과 토양의 입단 형성은 입자 사이의 공유결합, 수소결합 그리고 정전기적 인력에 의해 입단이 형성이 되지만 적절한 양의 PAM을 사용하지 않게 되면 토양의 입단 형성이 불가능해지게 된다[16-17]. 따라서 어떠한 기능으로 사용되며, 어느 환경에 사용될지를 생각한 후 적절한 양의

**Figure 1. The schematic diagram of variable head permeability tester.**

함량을 정하는 것 또한 토양바인더로서 중요한 부분 중의 하나이다.

그러나 지금까지의 연구는 대부분 음이온강도에 따른 토양의 투수계수에만 집중하였고 음이온 강도에 따른 토양바인더로서 토양의 강도 및 험수율에 대한 연구결과는 매우 부족하였다.

본 연구에서는 다양한 이온강도를 가진 anionic PAM을 토양바인더로 사용하여 토양바인더로서 투수계수에 미치는 영향 뿐 아니라 토양에 대한 결합강도 그리고 험수율에 미치는 영향까지도 조사하였다. 토양바인더가 험수율에 미치는 영향은 험수율이 식물생장에 필요한 부분이므로 이에 대한 가능성은 조사하였다. 험수율을 더욱 높이기 위한 첨가제로서 SAP를 사용하였고, SAP의 수분에 의한 팽창을 어느 정도 조절하기 위한 첨가제로서 cellulose ether (CE)를 다양한 비율로 혼합하여 그 효과를 관찰하였다. 토양시험편을 제조한 후 직접전단강도, 험수율 그리고 투수계수를 측정하여 토양 바인더로서의 효과를 관찰하였고 최적의 성분비를 도출하였다.

2. 실험

2.1. 실험재료 및 장치

본 실험에 사용된 토양은 입자사이즈를 균일하게 하기 위해 채로 친고운 마사토를 사용하였고, 분말형 음이온성 고분자 응집제인 anionic polyacrylamide (PAM)은 OCI-SNF 주식회사 제품(sodium 2-propenoate 2-propenamide polymer, 분자량 20-30 Mg/mol)을 사용하였다. 사용된 anionic polyacrylamide은 negative charge density가 high (35-45% hydrolyzed), medium (25-35% hydrolyzed, low (10-25% hydrolyzed)인 세 가지 anionic polyacrylamide (PAM)를 사용하였고, 이하 H PAM (high anionic polyacrylamide), M PAM (medium anionic polyacrylamide), L PAM (low anionic polyacrylamide)으로 표기하였다. Super absorbent polymer (SAP)는 고흡습성 수지로서 LG화학제품(Methylose, PMC-40SU)을 사용하였다.

본 실험을 진행하면서 중요한 부분 중 하나가 토양에 사용될 소재들의 첨가 비율이다. 만약 소재를 적당량 사용하지 않게 되면 견고해져야 할 토양의 구조가 안정화가 되지 않게 되어 토양바인더로서의 기능이 발휘되지 못하기 때문이다. 따라서 다양한 험량의 실험을 진행하여 Table 1과 Table 2와 같이 본 연구를 위한 가장 적절한 양의

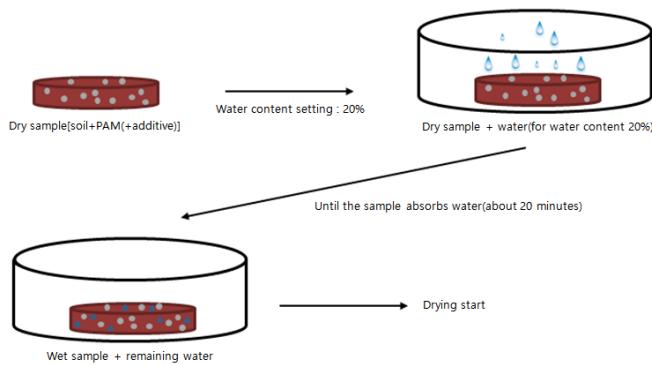


Figure 2. The schematic diagram of the measurement of water content.

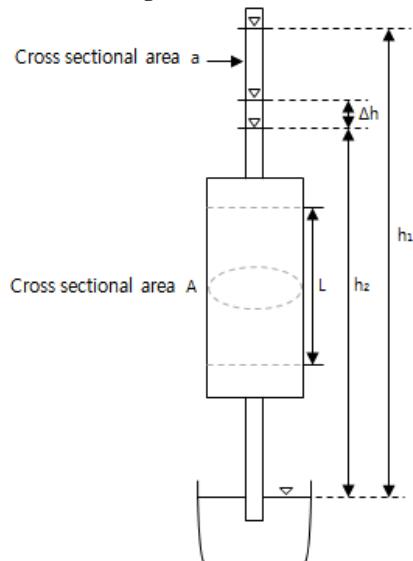


Figure 3. The schematic diagram of a variable permeability test.

샘플의 종류와 첨가 비율을 선정하였다.

본 실험에서는 함수율 측정을 위해 $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$ 온도 유지와 배기가 가능한 오븐을 사용하여 함수 변화를 측정하였고, Figure 1과 같은 변수위 투수계수 시험기를 이용하여 토양의 방수성을 시험하였다. 또한 토양의 강도를 실험하기 위하여 직접전단강도 기기를 사용하여 실험하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 함수율 측정

함수율 실험은 흙의 함수비 시험 방법인 KS F 2306에 따라 진행을 하였고 토양이 얼마만큼의 수분을 함유하고, 오랫동안 수분을 머금고 있는지를 보기 위한 실험으로 함수율을 계산하는 식과 실험 방법은 다음과 같다.

$$\text{함수비} (\%) = \frac{(m_2 - m_1)}{m_1} \times 100 (\%)$$

m_1 : 초기 수지 중량

m_2 : (흡수된 물의 무게 + 수지무게) = 총중량

함수율 측정 실험은 Table 1과 Table 2와 같은 샘플의 종류와 비율로 샘플을 제작하여 실험을 진행하였다. 실험은 Figure 2와 같이 함수

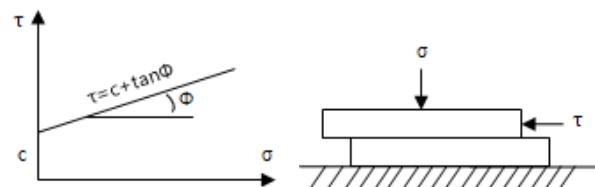


Figure 4. Overview of the direct shear strength test.

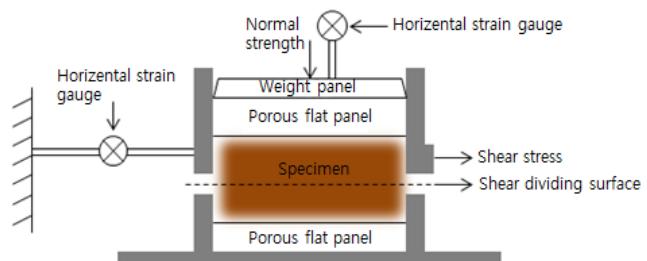


Figure 5. The schematic diagram of the direct shear strength test.

비가 0%인 샘플을 만든 후 모든 샘플을 함수비 20%로 균일하게 기준을 정하여 실험을 진행하였으며 샘플이 수분을 충분히 머금을 수 있도록 대기한 후 50°C ($\pm 5^\circ\text{C}$)인 오븐에 건조를 하였다. 수분을 머금은 샘플은 0 h부터 2 h 간격으로 무게를 측정하였으며 함수비가 0%에 가까워질 때까지 실험을 진행하였다. 이로 얻어진 실험값을 그래프화할 경우 24 h까지 만의 값을 사용하여 그레프로 작성하였다. 이는 실험이 24 h 이후로는 값의 오차가 커져 신뢰도가 많이 떨어지기 때문이다.

2.2.2. 변수위 투수계수 시험

흙의 투수성은 일정한 단위 면적을 단위시간 동안 통과한 물의 양인 투수계수로 표현된다. 흙의 투수계수를 구하는 방법에는 현장투수실험과 실내투수실험으로 나누어지고, 실내투수실험은 수위를 주는 방식에 따라 정수위 투수시험과 변수위 투수시험으로 나뉘게 된다. 일반적으로 정수위 투수시험은 사질토에서, 변수위 투수시험은 점성토에 적용된다. 이 시험방법은 KS F 2322의 규정에 따라 측정된다.

변수위 투수실험에서 투수계수는 다음의 식으로 계산한다.

$$k = 2.3 \frac{aL}{A} \frac{1}{t_2 - t_1} \log \frac{h_1}{h_2}$$

k : 포화투수계수(cm/s)

A : 흙속으로 물이 흐르는 단면적(m^2)

a : 스텐드 파이프의 단면적(cm^2)

t_1 : 측정시작시간(s), t_2 : 측정종료시간(s)

h_1 : t_1 에서의 수두(cm), h_2 : t_2 에서의 수두(cm)

2.2.3. 직접전단강도 시험

토양의 직접 전단 시험은 암밀 배수 조건에서 흙의 직접 전단 시험 방법인 KS F 2343에 따라 실험을 진행하였다. 흙의 직접 전단 시험에서는 Figure 4와 같이 전단면(파괴면)을 정해놓고 전단하중을 가하면서 그 면에서의 수직응력(σ), 전단응력(τ)을 직접 측정해서 Coulomb의 파괴식으로부터 점착력(c)과 전단저항각(φ)을 결정할 수 있다.

Coulomb의 파괴식은 다음의 식과 같다.

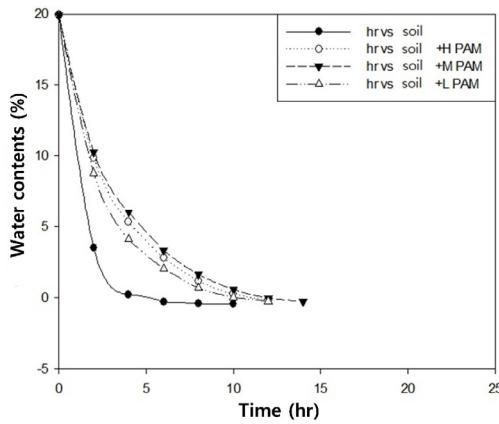


Figure 6. The graph of water content change of soil and (soil + H/M/L PAM)(H : high, M : medium, L : low ionic strength).

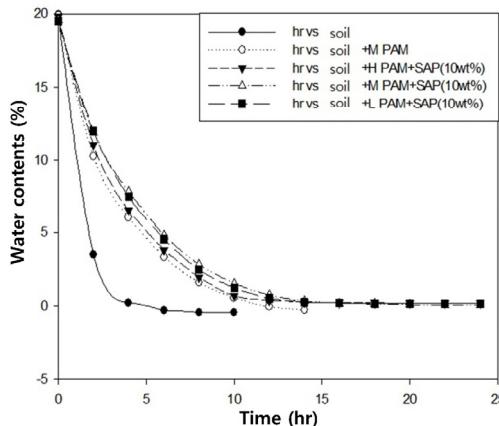


Figure 7. The graph of water content change of soil and (soil + H/M/L PAM + SAP (10 wt%)).

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

τ : 전단응력(kPa)

σ : 수직응력(kPa)

c : 점착력(kPa)

φ : 전단저항각

이해를 돋기 위한 Figure 5의 직접전단시험 장치의 개요를 보면 하중판 위에서 수직하중을 가한 후 수평방향에서 전단력을 가하여 시료를 전단파괴를 시킨다. 시료의 수직변위와 수평변위는 시험 장치의 다이얼케이지를 통하여 측정이 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 함수율 측정 결과 및 고찰

Figure 6은 마사토와 마사토에 음이온성이 다른 세 가지의 PAM을 적용했을 때의 함수비를 나타낸 그래프이다. 마사토만 사용한 경우보다 PAM을 적용한 경우 수분이 감소되는 정도와 유지되는 시간이 더 길어지는 것을 볼 수 있다. 이는 기본적으로 PAM이 토양을 응집하면서 수분도 함께 잡아주기 때문이다. 음이온성이 다른 PAM 중

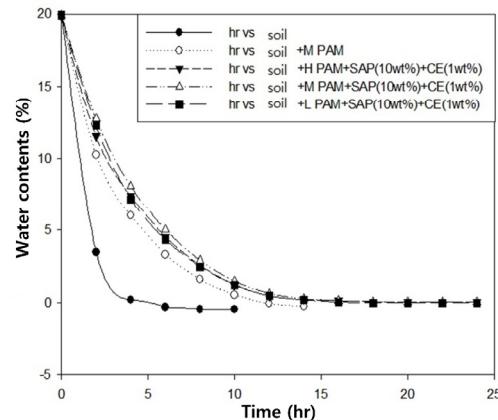


Figure 8. The graph of water content change of soil and (soil + H/M/L PAM + SAP (10 wt%) + CE (1 wt%)).

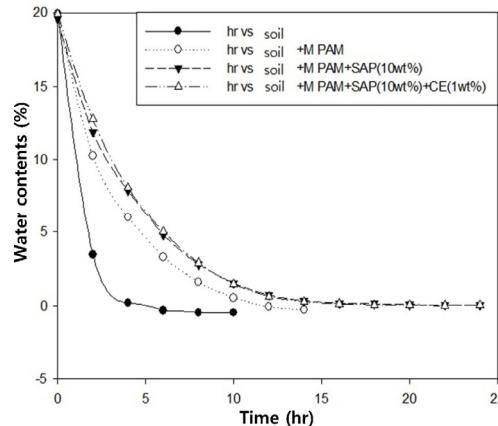


Figure 9. The graph of water content change of soil, (soil + M PAM), (Soil + M PAM + SAP (10 wt%)) and (soil + M PAM + SAP (10 wt%) + CE (1 wt%)).

에서는 M PAM이 가장 함수율이 좋은 것을 볼 수가 있다.

Figure 7은 앞서 실험한 마사토에 세 가지의 PAM을 적용한 경우에 추가로 SAP (10 wt%)를 첨가하여 실험한 함수비 그래프이다. SAP가 추가로 첨가된 샘플의 함수비가 적용되지 않은 경우 보다 좋게 나온 것을 볼 수가 있으며, SAP가 적용되지 않은 샘플에 비해 상대적으로 시간이 지나도 함수비가 0%로 떨어지지 않는 것을 볼 수가 있다. SAP가 적용된 샘플의 경우도 M PAM을 사용한 샘플이 함수비가 가장 좋게 나온 것을 볼 수가 있다.

Figure 8은 앞서 SAP (10 wt%)가 추가된 샘플에 CE (1 wt%)가 첨가된 샘플의 함수비 그래프이다. 이 경우도 마찬가지로 M PAM을 사용한 경우가 가장 함수비가 좋은 것을 볼 수가 있다.

Figure 9은 앞선 그래프에서 가장 좋은 함수비를 나타낸 경우를 모아놓은 그래프이다. 기본적으로 M PAM을 사용한 경우가 선정이 되었다. SAP (10 wt%)가 첨가된 경우와 SAP (10 wt%)와 CE (1 wt%)가 첨가된 경우를 보면 함수비가 크게 차이가 없는 것을 볼 수 있으나 그래프의 초기 변화를 보면 CE (1 wt%)가 첨가된 경우가 초반에 상대적으로 좋은 함수비를 나타내는 것을 볼 수가 있다.

이상 함수율 측정 실험에서는 M PAM을 사용한 경우가 함수율이 좋게 나온 것을 확인할 수 있었다. 함수율의 경우 이온의 강도 외에도

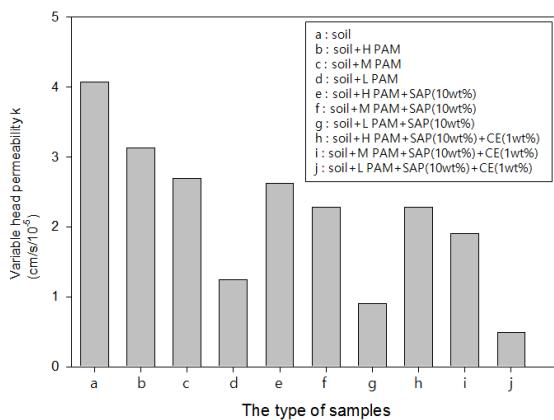


Figure 10. The results of above variable head permeability measurements.

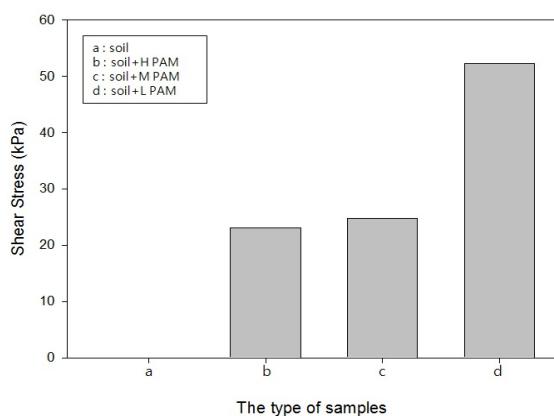


Figure 11. The graph of direct shear strength change of soil and (soil + H/M/L PAM).

수분을 흡수하였을 경우 토양안정제의 미세옹집구조에 의해 영향을 받을 수 있다[10]. 따라서 함수율이 이온강도에 단순 비례하거나 반비례하지 않음을 보여주고 있고 이온강도에 따른 차이가 크지 않음을 그러한 이유일 것으로 판단된다. 토양안정제의 토양속에서의 미세옹집구조에 관한 문헌은 아직 없는 상태이기 때문에 상세한 분석은 어려우나 실험결과에 대한 분석을 해보면 charge density가 높은 H PAM의 경우 수분과의 결합양도 높은 반면 토양과의 결합력도 강해지게 되며 charge density가 낮은 L PAM의 경우 수분과의 결합양은 적은 반면 토양과의 결합력이 약해지게 된다. 따라서 함수율 측면에서는 최적의 charge density가 존재하는 것으로 판단된다.

Figures 7, 8, 9에서 보면 초흡수성수지(SAP)를 사용한 경우 세 경우 (L, M, H PAM) 모두 함수율이 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 이는 초흡수성수지의 강한 수분흡수력에 의한 영향일 것으로 판단된다.

3.2. 변수위 투수계수 시험 결과 및 고찰

Figure 10은 변수위 투수계수 측정 결과 그래프이다. 투수계수 값이 작아진다는 것은 토양에서 수분의 통과가 어려워진다는 것을 뜻하며 전체적인 경향을 보면 토양안정제를 사용한 경우 사용하지 않은 경우에 비해 투수계수가 감소하였고 토양안정제를 사용한 경우 높은 charge density에서 낮은 charge density로 갈수록 투수계수 값이 감소함을 볼 수가 있다. 또한 응집제인 CE가 첨가된 경우 투수계수 값이 작아지는 것이 관찰되었다.

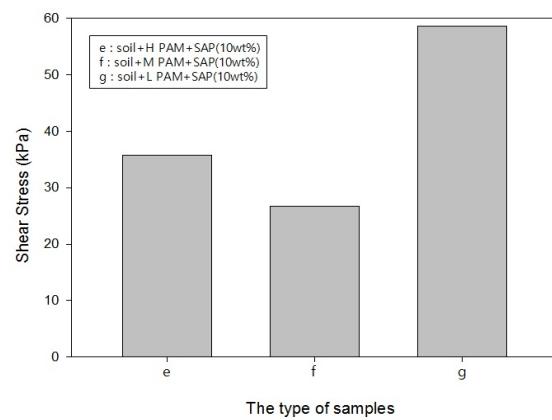


Figure 12. The graph of direct shear strength change of (soil + H/M/L PAM + SAP (10 wt%)).

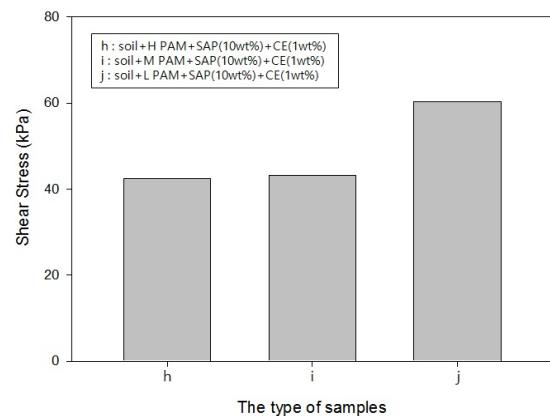


Figure 13. The graph of direct shear strength change of (soil + H/M/L PAM + SAP (10 wt%) + CE (1 wt%)).

투수계수 역시 함수율과 마찬가지로 charge density와 토양바인더의 토양 내에서의 미세옹집구조에 의해 영향을 받으므로[10] 미세옹집구조에 대한 구조를 파악하기 전에는 정확한 분석이 어렵다. 다만 Figure 10에서 나타난 결과의 경우 우선 토양안정제를 사용한 경우 사용하지 않은 경우와 비교하여 토양안정제가 물과 토양과의 결합력으로 인해 투수계수가 줄어들 수 있음은 쉽게 예측가능하다. Charge density가 작을수록 투수계수가 줄어드는 것은 charge density가 작을수록 유기고분자 자체끼리의 응집으로 인해 토양을 셀링(sealing)하는 효과가 크기 때문일 것으로 판단된다[12]. 또한 초흡수성수지(SAP)를 첨가함에 따라 투수계수가 줄어드는 것은 초흡수성수지가 물을 흡수하여 swelling되고 여기에 많은 물을 홀딩(holding)하기 때문일 것으로 판단된다. 응집제인 CE첨가에 따른 투수계수 감소는 그 첨가량과 효과는 매우 적어 어떤 결론을 내리기는 힘든 상태이다.

3.3. 직접전단강도 시험 결과 및 고찰

Figure 11은 순수마사토와 마사토에 세 가지의 음이온성이 다른 PAM이 적용된 샘플의 직접전단강도 실험 결과 그래프이다. 직접전단강도 값을 보면, 마사토만 사용된 경우 보다 PAM이 첨가된 경우 모두 직접전단강도가 높게 나온 것을 볼 수가 있고, 마사토의 직접전단강도에 비해 음이온성이 낮은 PAM을 사용할수록 값이 증가하는 것을 볼 수가 있다.

Figure 12는 마사토와 PAM에 SAP (10 wt%)가 추가된 샘플의 직접

전단강도 결과 그래프이다. Figure 11의 동일한 PAM이 사용된 샘플의 직접전단강도 값은 SAP (10 wt%)가 포함되지 않은 결과보다 SAP (10 wt%)가 포함되었을 경우 직접전단강도 값이 증가한 것을 볼 수가 있다.

Figure 13은 앞서 SAP (10 wt%)가 첨가된 샘플에 CE (1 wt%)가 추가된 샘플의 직접전단강도 결과 그래프이다. Figure 11과 Figure 12에서 동일한 PAM의 직접전단강도 값을 비교해보면 CE (1 wt%)가 첨가되었을 경우 값이 더 증가하였음을 볼 수가 있다.

직접전단강도 측정 실험 결과에서 보면 마사토만 사용한 경우보다는 응집역할을 하는 PAM을 사용했을 때 직접전단강도 값이 수십 배 증가함을 관찰할 수 있었고, 추가로 SAP를 사용하였을 경우 SAP의 -COO⁻기가 토양과의 결합을 하여 값이 더욱 증가한 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 PAM과 SAP의 음이온이 토양속의 다양한 금속 양이온들과의 정전기적 결합에 의한 것이라 판단된다[10].

또한 charge density가 낮을수록 직접전단강도 값이 높게 나온 것을 볼 수가 있는데 이는 charge density가 너무 높으면 flexible한 정도가 낮아서 전단힘이 의해 쉽게 파괴되는 반면 charge density가 낮을수록 결합강도가 낮고 유연하여 전단힘이 가해졌을 때 쉽게 파괴되지 않기 때문에 직접전단강도 값이 높게 나오게 된다고 판단된다. SAP를 첨가할 경우 charge density를 높여 결합강도는 높이기는 하지만 SAP가 하이드로겔의 일종이므로 자체의 유연성 때문에 전단강도를 높이는 효과가 있음을 볼 수 있다. 응집제인 CE의 경우 중점효과와 응집효과로 인해 재료 간 분리를 방지함으로서 전단강도 값을 더욱 증가시킴을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서의 실험결과를 종합하여 보면 우선 음이온 PAM을 주재료로 사용한 토양비인더를 마사토에 적용하여 물성을 측정해본 결과 토양비인더를 사용한 경우 사용하지 않은 경우에 비해 토양의 함수율, 냉수효과 그리고 전단강도 물성을 크게 향상시킬 수 있었다. 음이온 charge density에 따른 효과는 단순한 비례 혹은 반비례 관계를 갖지 않았는데 이에 대한 해석은 토양비인더가 토양 속에서 charge density에 따라 어떠한 미세응집구조를 이루고 있는지가 지금까지 제대로 알려져 있지 않았고 미세응집구조 변화에 따른 물성영향 분석미비로 어려움이 있는 상태이다.

함수율 측정 실험에서는 M PAM을 사용한 경우가 함수율이 좋게 나온 것을 확인할 수 있었다. Charge density가 높은 H PAM의 경우 수분과의 결합양이 높은 반면 토양과의 결합력이 강해지고 charge density가 낮은 L PAM의 경우 수분과의 결합양은 적은 반면 토양과의 결합력이 약해지게 되어 함수율 측면에서는 최적의 charge density가 존재하는 것으로 판단된다. 초흡수성수지(SAP)를 사용한 경우 모두 함수율이 증가하였는데 초흡수성수지의 강한 수분흡수력에 의한 영향일 것으로 판단되었다.

토양비인더가 물과 토양과의 결합력으로 인해 투수계수가 줄어듦을 관찰할 수 있었으며 charge density가 작을수록 투수계수가 줄어드는 것은 charge density가 작을수록 유기고분자 자체끼리의 응집으로 인해 토양을 씰링(sealing)하는 효과가 크기 때문일 것으로 판단되며 초흡수성수지(SAP)를 첨가함에 따라 투수계수가 줄어드는 것은 초흡수성수지가 물을 흡수하여 swelling되고 여기에 많은 물을 훌딩(holding)하기 때문일 것으로 판단된다.

직접전단강도 측정 실험 결과에서 보면 마사토만 사용한 경우보다

는 응집역할을 하는 PAM을 사용했을 때 직접전단강도 값이 수십 배 증가함을 관찰할 수 있었고 추가로 SAP를 사용하였을 경우 값이 더욱 증가한 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 PAM과 SAP의 음이온이 토양 속의 다양한 금속 양이온들과의 정전기적 결합에 의한 것이라 판단된다. 또한 charge density가 낮을수록 직접전단강도 값이 높게 나온 것은 charge density가 낮을수록 결합강도가 낮고 유연하여 전단힘이 가해졌을 때 쉽게 파괴되지 않기 때문에 그 값이 높게 나오게 된다고 판단되며, SAP를 첨가할 경우 SAP 재료의 유연성 때문에 전단강도를 높이는 효과가 있음을 볼 수 있었다.

References

1. J. H. Kim, S. W. Park, S. S. Jeong, and J. H. Yoo, A study of stability analysis on unsaturated weathered slopes based on rainfall-induced wetting, *J. Korean Geotech. Soc.*, **18**(2), 123-136 (2002).
2. G. M. Sa, M. S. Kim, S. S. Kim, and I. Y. Lee, Analysis on the rainfall driven slope failure adjacent to a railway: Flume tests, *J. Korean Geotech. Soc.*, **22**(5), 83-91 (2006).
3. Y. S. Song, W. P. Hong, J. M. Yun, and T. Y. Kim, Slope stability considering infiltration velocity during rainfall, In: Korean Society of Civil Engineers Annual Conference, 4454-4457 (2005).
4. S. E. Cho and S. R. Lee, A comparative study of surficial stability analysis in unsaturated soil slopes, *J. Korean Geotech. Soc.*, **17**(4), 135-143 (2001).
5. Y. S. Kim, J. H. Kim, I. H. Bhang, and S. G. Seo, A study on rainfall-induced erosion of land surface on reinforced slope using soil improvement material, *J. Korean Geotech. Soc.*, **29**(1), 49-50 (2013).
6. B. Trzebiatowski, T. Edil, and C. Benson, Case study of subgrade stabilization using fly ash: State Highway 32, Port Washington, Wisconsin. In: ASCE Civil Engineering Conference and Exposition 2004, ASCE GSP No. 127, 123-136 (2005).
7. T. B. Edil, H. A. Acosta, and C. H. Benson, Stabilizing soft fine-grained soils with fly ash, *J. Mater. Civil Eng.*, **18**(2), 283-294 (2006).
8. K. H. Kim, Y. T. Kim, and S. H. Lee, A study on slope reinforcing effects using soil stabilizer, *J. Korean Geotech. Soc.*, **26**(10), 5-6 (2010).
9. J. A. Entry, R. E. Sojka, M. Watwood, and C. Ross, Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants, *Environ. Pollut.*, **120**, 192-193 (2002).
10. V. S. Green, D. E. Stott, L. D. Norton, and J. G. Gravelle, Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64**, 1786-1790 (2000).
11. J. A. Entry, R. E. Sojka, M. Watwood, and C. Ross, Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants, *Environ. Pollut.*, **11**, 183-185 (2002).
12. I. Shainberg and G. J. Levy, Organic polymers and soil sealing in cultivated soils, *Soil Sci.*, **158**, 267-273 (1994).
13. J. Idowu and S. Angadi, Understanding and managing soil compaction in agricultural fields, Agricultural Science Center at Clovis, New Mexico State University, *Circular*, **672**, 2-3 (2013).
14. A. Wallance and G. A. Wallance, Need for solution or exchange-

- able calcium and/or critical EC level for flocculation of clay by polyacrylamides. In: Proceedings of the Managing Irrigation-Induced Erosion and Infiltration with Polyacrylamide, pp. 59-63, May 6-8, Twin Falls, ID, USA (1996).
15. M. Ben-Hur, M. Malik, J. Letey, and U. Mingelgrin, Adsorption of polymers on clays as affected by clay charge and structure, polymer properties, and water quality, *Soil Sci.*, **153**(5), 349-356 (1992).
16. S. B. Kanungo, Effect of some commercial flocculating agents on settling and filtration rates of low grade, fragile manganese ores of Andhra Pradesh, *Indian J. Chem. Technol.*, **12**, 557-558 (2005).
17. B. K. G. Theng, *Formation and Properties of Clay-Polymer Complexes*, 2nd ed., 60-63, Elsevier (2012).