알긴산 나트륨을 보강한 지반의 함수특성을 고려한 저수지 사면안정성 평가

Slope Stability Evaluation of Reservoir Considering Soil-water Characteristic Curve of the Reinforced Ground Including Alginate Sodium Salt

신재용* · 이승수** · 정종원***

Shin, Jaeyong*, Lee, Sungsu**, and Jung, Jongwon***

Abstract

Alginate sodium salt is a type of biopolymer. It is a polysaccharide obtained from the most widely distributed brown algae among marine plants. Its main characteristics are nontoxicity and biodegradability. It is also considered a natural eco-friendly material because it is completely decomposed by microorganisms using only water and carbon dioxide. Moreover, sodium alginate aqueous solution mixed with water has high viscosity; hence, it is expected to effectively saturate and reinforce the soil. The soil-water characteristic curve shows the properties of the capillary pressure according to the water content of the soil. In other words, this curve can predict the shear strength of the soil. In this study, soil-water characteristic curves of soil reinforced with sodium alginate were studied. The stability of the reservoir slope reinforced with sodium alginate was evaluated using the input values of the numerical analysis, and the change in the shear strength of the soil was calculated. The results show that the increased concentration of sodium alginate solution increased the capillary pressure and residual water content of the soil-water characteristic curve, which increased the stability of the reservoir slope. The shear strength of the soil increased as the concentration and capillary pressure of the sodium alginate solution increased.

Key words : Biopolymer, Sodium Alginate, Unsaturated Soil, Soil-water Characteristic Curve, Reservoir Stability Analysis

요 지

바이오폴리머의 일종인 알긴산 나트륨은 해양 식물 중 가장 많이 분포된 갈조류로부터 얻어지는 다당류로서 무독성 및 생분해성을 나타낸다. 알긴산 나트륨은 미생물에 의해 물과 이산화탄소만으로 완전히 분해되기 때문에 자연 친환경적인 재료로 여겨진다. 또한, 물과 혼합된 수용액은 지반의 공극에 주입하여 강도를 보강하는 데 효과적으로 기대된다. 함수특성곡선은 지반의 함수비에 따른 모관흡수력의 특성을 나타내는 곡선으로써, 지반의 투수성 및 전단강도 변화를 예측할 수 있다. 본 연구에서는 알긴산 나트륨으로 보강된 지반의 함수특성곡선을 산정하였다. 실험으로 산정된 함수특성곡선을 수치해석의 입력값으로 활용하여 알긴산 나트륨으로 보강된 저수지 사면의 안정성을 평가하였다. 또한, 함수특성곡선 및 이론식을 활용하여 알긴산 나트륨 보강 및 함수비에 따른 지반의 전단강도 변화를 산정하였다. 그 결과, 알긴산 나트륨 수용액의 농도가 증가할수록 지반의 공기주입압력 및 잔류포화도가 증가하고, 저수지 사면의 안정성이 증가함을 확인하였다. 또한, 알긴산 나트륨 수용액의 농도 및 모관흡수력이 증가할수록 지반의 전단강도는 증가함을 확인하였다.

핵심용어 : 바이오폴리머, 알긴산 나트륨, 불포화 지반, 함수특성곡선, 저수지 안정 해석

*정회원, 충북대학교 토목공학과 석사(E-mail: skyys1121@naver.com)

Member, Master, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

**정회원, 충북대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-43-261-3344, Fax: +82-43-275-2377, E-mail: sungsulee@chungbuk.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

***교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학과 부교수(Tel: +82-43-261-2405, Fax: +82-43-275-2377, E-mail: jjung@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

1. 서 론

바이오폴리머는 바이오매스로부터 만들어진 플라스틱의 일종으로 주로 곡물이나 미생물로부터 만들어진다. 또한, 미생물에 의해 물과 이산화탄소로 완전히 분해되기 때문에 자연 친환경적인 재료로 여겨진다. 바이오폴리머의 일종인 알긴산 나트륨(Alginic Acid Sodium Salt, SA)은 해양 식물 중 가장 많이 분포된 갈조류에서 얻어지는 다당류로서 무독성 및 생분해성을 나타낸다(Park et al., 2008; Cao et al., 2016). 또한, 물과 혼합된 수용액의 경우 점도가 높기 때문에 공극을 채움으로써 지반을 보강하는데 효과적으로 기대되고 있으나, 이에 관한 연구가 부족한 실정이다(Jung and Jang, 2016). 따라서, 본 연구에서는 수용성 성질을 지닌 알긴산 나트륨(SA)을 포함한 시료의 흙-물 함수특성을 분석하고, 알긴산 나트륨(SA) 보강에 따른 지반의 불포화 특성 및 강도 변화 특성 연구를 수행하였다.

지반은 공극의 포화도에 따라 포화, 불포화, 및 건조 지반으로 구분된다. 이 중 불포화 지반은 흙, 물 및 공기의 삼상구조로 이뤄져 있다(Kim, 2007). 물과 공기가 공극 내에 공존할 때, 물과 공기 사이에 형성되는 얇은 막을 물-공기 접촉면이라 부르고, 접촉면에 작용하는 힘을 표면장력이라 일컫는다(Kim, 2010). 표면장력과 공기압이 평형을 이룰 때, 부(-)간극수압인 모관흡수력(Capillary Pressure)을 발생하게 된다(Fredlund et al., 2003; Pham et al., 2005; Pham and Fredlund, 2008). 모관흡수력에 의해 물 분자는 흡입자 표면에 흡착하려고 하고, 이로 인해 흡입자간 전단강도는 증가하게 된다. 따라서, 모관흡수력은 공극 내의 포화도에 의해 변화하고, 지반의 전단 강도에 영향을 끼치게 된다(Shin, 2011). 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)은 함수비에 따라 부(-)간극수압에 의해 발생하는 모관흡수력의 변화를 나타내는 곡선이다(Fig. 1).

Fig. 1은 체적함수비(Degree of Saturation)와 모관흡수력의 관계를 나타내는 함수특성곡선(SWCC)이다(Fredlund et al., 2011).

Fig. 1. Example of Soil-Water Characteristic Curve (SWCC)

함수특성곡선(SWCC)은 S자 모양을 주로 나타내고, 곡선의 접선을 활용하여 공기주입압력(Air Entry Pressure) 및 잔류 함수비(Residual Water Saturation)를 산정할 수 있다(Fredlund, 2016). 공기주입압력은 공극 내에 공기가 유입되는 시점을 의미하며, 포화 영역과 불포화 영역을 구분하는 경계점이다(Kim, 2007). 잔류포화도(Residual Water Saturation)는 모관흡수력이 증가하여도 더 이상 공극 내에 물이 배출되지 않는 상태의 함수비를 의미하며 불포화 영역과 잔류포화 영역을 구분하는 경계점이다. 따라서, 공기주입압력과 잔류포화도를 활용해서 함수특성곡선(SWCC)은 3가지 영역으로 분류할 수 있는데 각각 포화 영역, 불포화 영역, 잔류포화 영역으로 분류된다(Shin, 2011).

2. 실내시험 및 수치해석

2.1 시험 재료

본 연구에서는 지반 보강 재료로써 바이오폴리머의 일종인 알긴산 나트륨(SA)을 활용하였다(Fig. 2). Fig. 3은 알긴산 나트륨(SA)의 화학식을 나타낸다. 알긴산 나트륨(SA) 수용액은 점도가 10~130 cps로 물에 비해 높고, 가열이나 냉각에도 쉽게 굳지 않는 성질을 지니고 있다. 본 연구에서는 이러한 특성을 활용하여 흙 입자의 결합력을 증가시켜주는 천연 보강 재료로 활용하고자 하였다.

Fig. 2. Seaweed as a Raw Material of Alginic Acid Sodium Salt

Fig. 3. Chemical Formula of Alginic Acid Sodium Salt

2.2 시험 장비 및 절차

본 연구에서 함수특성곡선(SWCC)을 구하기 위해 사용한 시험 장비는 GCTS사의 SWC-150이다. 시험 장비의 구성

요소는 패널(Panel), 공기 주입 장치(Air Pressure), 셀(Cell)로 이루어져 있다(Fig. 4). 패널(Panel)은 고압력 및 저압력에서 사용 가능한 듀얼 게이지(Pressure Gage)와 압력 조절기(Pressure Regulator)가 부착되어 있다. 패널에 부착되어 있는 Water Volume Tube를 통해 시료의 공극으로부터 나온 물의 양을 측정하여 시료의 함수비를 산정하였다. 공기주입 장치(Air Pressure)는 최대 400 kPa까지 압력의 조절이 가능하다. 셀(Cell)은 상단 및 하단 플레이트로 구성되어 있다. 상단 플레이트는 하중재하장치와 연결되어 있고, 하단 플레이트에는 다공성 세라믹 디스크가 놓여있다. 이를 통과하여 시료의 물이 배출할 수 있는 라인(Water Line)이 연결되어 있다.

Fig. 4. Experimental Devices for Soil-water Characteristic Curve Test

SWC-150을 활용한 함수특성곡선(SWCC) 시험 순서는 다음과 같다. 수침에 의해 세라믹 디스크를 포화시킨 후, 하부 플레이트에 장착하고 내부 셀을 하부 플레이트 위에 설치한다(Fig. 5). 내부 셀에 물을 약 20% 정도 채운 뒤, 시료를 넣어준다. 이를 5번 반복함으로써, 시료를 완전 포화시킨다. 외부 챔버 및 상단 플레이트를 설치한 뒤, 압력을 가함으로써 시험을 시작한다. 물이 처음으로 빠져나오기 시작할 때까지 압력을 순차적으로 증가시킴으로써, 시험을 진행시킨다. 물이 처음으로 빠져나올 때의 압력을 공기주입 압력이라 일컫는다. 이후, 각 압력단계에서 물이 빠져나오면 그 양을 측정하고, 더 이상 물이 빠져 나오지 않을 때까지 기다린 후, 다음 단계로 압력을 증가시킨다. 이를 반복하여 실험을 진행하고, 최종적으로 압력을 증가시켜도 더 이상 물이 빠져나오지 않을 때, 시료의 함수비를 잔류함수비(Residual Water Saturation)이라 일컫는다. 2-3단계 정도 압력을 조금 더 증가시킨 후, 물이 더 이상 나오지 않음을 확인한 뒤 시험을 종료한다. 각 압력단계에서 시료로부터 흘러나온 물의 양을 측정하여, 시료의 함수비를 산정하여 함수특성곡선(SWCC)을 구할 수 있다.

Fig. 5. Schematic Drawing of Experimental Setup for Soil-Water Characteristic Curve Test

2.3 저수지 사면 안정성 평가

Seep/w와 Slope/w를 활용하여 알긴산 나트륨(SA)으로 보강된 저수지의 침투해석 및 사면 안정성 평가를 수행하였다. 수치해석에 활용된 물성치는 도로설계요령을 참고하여 산정되고, Table 1과 같다(GEO-SLOPE International Ltd., 2015a, 2015b).

Table 1. Material Properties for Numerical Analysis

Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kpa)	Friction angle (°)	Coefficient of Permeability (cm/s)
Riprap	19	0	40	1.8
Upper layer	19	5	25	1e-4
Bottom layer	19	5	35	1e-2
Bedrock				1e-9
Core	15	50	15	5e-7

저수지는 국가건설기준센터에 의거하여 기본적으로 설계가 이뤄진다. 해석 대상 저수지의 단면 형상, 기본 제원, 댐마루(Crest of Dam), 평수위(Normal Water Level, N.W.L), 만수위(High Water Level, H.W.L), 상부 지반(Upper Layer) 및 하부 지반(Bottom Layer)은 Figs. 6~7과 같다. 본 연구의 수치해석에서는 가장 대표적인 저수지 높이인 표고 10 m와 30 m에 대해 안정성을 평가하였다. 수위는 평수위 수위로써 여유고 2 m를 두고, 사면 경사는 상류 사면 1.25, 하류 사면 1.285로 설계기준에 의해 결정하였다. 상류 사면의 수위는 평수위에 대한 안정성 검토 수행하였다.

Seep/w를 활용한 침투해석의 경우 정상류 흐름 상태를 고려하여 수치해석을 수행하였다. 상류 사면은 전수두를 고려하고, 하류 사면은 압력 수두를 '0'으로 하여 해석을 수행하였다. Slope/w를 활용한 안정성 평가에서 알긴산 나트륨(SA)을 포함한 지반의 함수특성곡선(SWCC)을 입력값으로

Fig. 6. Representative Reservoir Section (H = 30 m)

Fig. 7. Representative Reservoir Section (H = 10 m)

사용하였다.

침투해석 후 저수지의 사면안정 해석을 수행하였다. 저수지의 사면 안정 해석은 Bishop의 간편법을 활용하였으며, 비탈면 파괴 형상은 원형 파괴로 가정하였다.

3. 실내시험 및 수치해석 결과

3.1 함수특성곡선(SWCC) 실내 시험 결과

실트질 시료를 0 g/L, 3 g/L, 10 g/L 농도의 알긴산 나트륨(SA) 수용액으로 포화시킨 후, 함수특성곡선(SWCC) 실험을 수행하였다. Fig. 8은 0 g/L, 3 g/L, 10 g/L 농도알긴산 나트륨(SA) 수용액의 함수특성곡선(SWCC)을 나타낸다.

Fig. 8. The Effects of Alginic Acid Sodium Salt Concentration on Soil-Water Characteristic Curve

Fig. 9. The Effect of Alginic Acid Sodium Salt Concentration on Residual Water Saturation

Fig. 10. The Effect of Alginic Acid Sodium Salt Concentration on Air Entry Pressure

Figs. 9~10은 알긴산 나트륨(SA) 수용액 농도 증가에 따른 잔류포화도 및 공기주입압력 변화로써, 농도가 증가함에 따라 공기주입압력 및 잔류포화도가 증가하고 있다.

알긴산 나트륨(SA)을 포함하지 않은 수용액으로 포화된 실트의 공기주입압력과 잔류포화도는 각각 4 kPa, 20.74%이다. 알긴산 나트륨(SA) 농도 3 g/L 수용액으로 포화된 실트의 경우 공기주입압력은 8 kPa로 증가하였으며, 잔류포화도는 27.05%로 증가하였다. 알긴산 나트륨(SA) 농도 10 g/L 수용액으로 포화된 실트의 공기주입압력은 12 kPa로 증가하였으며, 잔류포화도는 33.03%로 증가하였다. 알긴산 나트륨(SA) 수용액의 점성이 일반 물에 훨씬 더 높기 때문에 간극 내에 막힘 현상이 발생하고 흡표면의 부착력이 증가한다. 이로 인해 공기주입압력 및 잔류포화도가 증가하게 된 것으로 판단된다.

3.2 이론 및 시험결과와 비교 분석

Eq. (1)은 Fredlund and Xing (1994)가 제안한 이론식을 나타낸다. Table 2는 Eq. (1)에 사용된 값들의 의미를 나타낸다.

Table 2. Notation of Equation (1)

θ	Volumetric water content
θ_s	Saturated Volumetric water content
θ_r	Residual Volumetric water content
a	Fitting parameter
n	
m	
ψ	Capillary pressure
ψ_r	Residual Capillary pressure
$C(\psi)$	Correction function

Fig. 11. Comparison of Experimental Results and Theoretical Curve

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

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{\psi_r} \right)} \right] \quad (1)$$

Fig. 11은 본 연구에서 사용된 알긴산 나트륨(SA) 수용액을 포함하지 않은 실트질 점토의 함수특성곡선(SWCC)과 Eq. (1)을 통해 얻어진 결과를 나타낸다. 각 곡선의 함수값은 Table 3과 같다. 두 결과를 통해 본 연구에서 사용된 시험기기 및 방법의 타당성을 검증하였다.

Table 3. Fitting Parameters Using Equation (1) by Fredlund and Xing

θ_s	0.539
θ_r	0.207
a	15.5
n	2.83
m	0.4
ψ_r	360 kPa

3.3 수치해석을 활용한 저수지 안정성 평가

Fig. 12는 알긴산 나트륨(SA) 수용액 농도 증가에 따른 저수지 사면의 안정성 변화를 나타낸다. 제체 높이가 30 m인 경우, 알긴산 나트륨(SA) 수용액 농도가 0 g/L일 때 저수지의 안전율은 1.40을 나타낸다. 농도가 3 g/L일 때 안전율은 1.42 농도가 10 g/L일 때 안전율 1.46으로 증가한다. 또한, 제체 높이가 10 m인 경우는, 농도가 0 g/L일 때 안전율은 1.83이다. 그리고, 농도가 3 g/L일 때 안전율은 1.86, 농도가 10 g/L일 때 안전율 1.87로 농도가 증가함에 따라 안전율이 증가하였다.

Fig. 12. Safety Rate Changes at Reservoir Height 10 m and 30 m

3.4 SWCC와 전단 강도의 관계

불포화 지반의 전단 강도는 Eq. (2)를 활용해 구해질 수 있다(Vanapalli et al., 1996). Table 4는 Eq. (2)에 사용된 값들의 의미를 나타낸다. Fig. 13은 본 연구에서 사용된 물로 포화된 실트 및 알긴산 나트륨(SA) 수용액을 포함한 실트의 모관흡수력의 변화에 따른 전단강도 변화를 보여준다. 전응력 19 kN/m, 점착력 5 kPa, 내부마찰각 25°는 저수지 설계에 사용되는 대표적인 값으로 설계기준에 의해 선정되었다. 그 결과 알긴산 나트륨(SA) 수용액 농도 및 모관흡수력이 증가함에 따라 전단 강도가 증가함을 확인 할 수 있다. 따라서, 알긴산 나트륨(SA) 수용액으로 보강된 저수지의 안정성 증가에 영향을 준 것으로 판단된다. Table 5는 바이오 폴리머 농도 증가에 따른 포화도를 나타내고 있으며, 특히 잔류포화도가 증가함을 확인할 수 있다.

Table 4. Notations for Equation (2)

θ	Volumetric water content
θ_s	Saturated Volumetric water content
θ_r	Residual Volumetric water content
u_a	Pore air pressure
u_w	Pore water pressure
c'	Effective cohesion
ϕ'	Effective friction angle

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi' \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \quad (2)$$

Fig. 13. Shear Strength Variation by the Increase in Capillary Pressure at Soil Including Alginic Acid Sodium Salt Solution

Table 5. Parameters used for Equation 2

	θ_s	θ_r
Silt	0.539	0.207
SA 3g/l	0.539	0.271
SA 10g/l	0.559	0.331

4. 결 론

본 연구에서는 알긴산 나트륨(Alginic Acid Sodium Salt, SA)의 농도에 따른 흙-물 함수특성곡선(SWCC)을 시험을 통하여 분석하고, 수치해석을 활용하여 알긴산 나트륨(SA)으로 보강된 저수지의 안정성을 평가하였다. 또한, 알긴산 나트륨(SA)으로 보강된 지반의 전단강도 변화를 기존의 이론식을 통하여 산정하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 사용된 실험장비는 알긴산 나트륨(SA)을 포함하지 않은 실트질 시료의 함수특성곡선(SWCC)을 이론식과 비교 및 분석함으로써 검증하였다.
- (2) 알긴산 나트륨(SA)의 농도가 증가함에 따라 함수특성곡선(SWCC)의 공기주입압력(Air-Entry Pressure) 및 잔류포화도(Residual Water Saturation)는 증가한다.
- (3) 알긴산 나트륨(SA)으로 저수지의 제체가 보강된 경우, 농도가 증가할수록 제체의 사면 안정성은 증가한다. 알긴산 나트륨(SA)의 농도가 증가함에 따라 함수특성곡선(SWCC)의 공기주입압력 및 잔류포화도는 증가가 사면의 안정성에 영향을 끼친 것으로 판단된다.
- (4) 알긴산 나트륨(SA)으로 보강된 흙의 전단강도는 농도가 증가할수록 크게 나타난다.

- (5) 지반의 모관흡수력이 증가할수록 흙의 전단강도는 증가함을 나타내고 있으나, 일정한 값에 도달한 후에는 더 이상 증가하지 않는다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부의 방재안전분야 전문인력 양성사업의 지원 및 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009)으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Cao, S.C., Bate, B., Hu, J.W., and Jung, J.W. (2016). Engineering behavior and characteristics of water-soluble polymers: Implication on soil remediation and enhanced oil recovery. *Sustainability*, Vol. 8, No. 3, 205. doi:10.3390/su8030205
- Fredlund, D.G. (2016). State variables in saturated-unsaturated soil mechanics. *Soils and Rocks*, São Paulo, Vol. 39, No. 1, pp. 3-17.
- Fredlund, D.G., and Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532.
- Fredlund, D.G., Barbour, S.L., and Pham, H.Q. (2003). Evaluation of hysteresis models for predicting the boundary wetting curve. *Proceedings of Second Asian Conference on Unsaturated Soils*, pp. 407-412.
- Fredlund, D.G., Sheng, D., and Zhao, J. (2011). Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 48, No. 2, pp. 186-198.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2015a). *Seepage modeling with SEEP/W*. An Engineering Methodology June 2015 Edition
- GEO-SLOPE International Ltd. (2015b). *Stability modeling with SLOPE/W*. An Engineering Methodology June 2015 Edition
- Jung, J., and Jang, J. (2016). Soil-water characteristic curve of sediments containing a polyacrylamide solution. *Géotechnique Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 89-94.
- Kim, B.S. (2007). *The effect of rainfall patterns on slope stability in unsaturated weathered soils*. Master's thesis, Dankook University.
- Kim, D.H. (2010). *Unsaturated characteristics and slope stability analysis of weathered granitic soils*. Master's thesis, Kangwon National University.

- Park, K.E., Park, S.A., Kim, G.H., and Kim, W.D. (2008). Preparation and characterization of Sodium Alginate/PEO and Sodium Alginate/PVA nanofiber. *Polymer (Korea)*, Vol. 32, No. 3, pp. 206-212.
- Pham, H.Q., and Fredlund, D.G. (2008). Equations for the entire soil-water characteristic curve of a volume change soil. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 4, pp. 443-453.
- Pham, H.Q., Fredlund, D.G., and Barbour, S.L. (2005). A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 6, pp. 1548-1568.
- Shin, J.S. (2011). *The analysis and prediction of unsaturated characteristic for Nak-dong River silty sand*. Kyungpook National University.
- Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahi, D.E., and Clifton, A.W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 379-392.

Received	■ June 24, 2020
Revised	■ June 25, 2020
Accepted	■ July 6, 2020