점토의 액성한계를 통한 이온농도에 따른 사면 안정성 평가

Assessing Slope Stability of Clay-Dominated Sediments Based on Ionic Concentrations Using Liquid Limits

김준기* · 원종묵**

Kim, Joongi*, and Won, Jongmuk**

Abstract

Clay minerals typically exhibit high specific surfaces with negative charges, which result in a sensitive response against the change in the ionic concentration of pore water. In this study, the liquid limits of kaolinite, illite, and bentonite were determined as functions of the ionic concentration, and the results were used to obtain the cohesion and friction angle based on the empirical relationship for evaluating slope stability through numerical simulations. The experimental and numerical results revealed increased liquid limits and a decreased strength-reduction factor as the ionic concentration increased. Based on the numerical results, the influence of ionic concentration on the slope stability of clay-contained soils was analyzed.

Key words : Clay Minerals, Slope Stability, Liquid Limit, Numerical Simulation, Ionic Concentration

요 지

점토는 일반적으로 높은 비표면적과 음의 표면전하를 띠고 있으며 이로 인하여 간극수의 이온농도 변화에 매우 민감하다. 본 연구에서는 대표적인 점토인 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트의 이온농도에 따른 액성한계를 통하여 기존의 경험식을 이용한 점착력(cohesion)과 내부마찰각(friction angle)을 산정하고 이를 통하여 이온농도에 따른 사면안정해석을 수행하였다. 실험 및 수치해석 결과 이온농도가 증가할수록 점토의 액성한계는 감소하였고 사면의 strength reduction factor (SRF)는 증가하였다. 본 연구결과를 통하여 이온농도의 변화가 점토를 포함한 지반의 사면 안정성에 끼치는 영향에 대하여 고찰하였다.

핵심용어 : 점토, 사면안정, 액성한계, 수치해석, 이온농도

1. 서 론

우리나라에서는 최근에 경주의 산대저수지 붕괴, 영천의 괴연저수지 붕괴, 기장의 내덕저수지 붕괴 등 댐의 붕괴 피해가 일어나고 있다(Heo and Chung, 2019). 일반적으로 댐의 붕괴는 파괴면에서 흙의 전단강도 감소에 따라 발생하며 순간적으로 강한 강우나 지속적인 내부침식 등이 전단강도 감소의 원인이 된다. 이러한 댐의 붕괴 및 사면 파괴를 방지하기 위하여 수치해석을 통한 주어진 조건에서의 댐의 붕괴 가능성을 산정된 안전율을 통하여 평가한다. 신뢰성

높은 수치해석의 수행을 위해서는 정확한 흙의 물성치가 수치해석에 이용되어야 한다. 점토입자의 표면은 음전하를 띠고 있어 이중층수를 형성하며 점토의 물리적, 화학적 거동은 간극수의 화학적 성질에 큰 영향을 받는다. 일반적으로 간극수의 높은 이온농도는 상대적으로 적은 점토입자의 이중층수 두께를 유발하며 이는 점토지반의 높은 투수계수와 전단강도로 이어진다. 따라서 점토가 많은 사면의 안정성 해석에는 이온농도의 영향이 반드시 수반되어야 한다. 이온농도의 변화는 사면의 안전율을 변화시킬 수 있기 때문에 이온농도에 따른 지반의 물성치가 수치해석에 적용되어야

*정회원, 울산대학교 건설환경공학부 석사과정(E-mail: kimjk0929@naver.com)

Member, Master Student, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

**교신저자, 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수(Tel: +82-52-259-2279, Fax: +82-52-259-2629, E-mail: jmwon@ulsan.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

한다. 하지만 이온농도에 따른 사면 안전을 평가에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 연구에서는 fall cone test를 수행하여 이온농도가 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트의 액성한계에 끼치는 영향에 대하여 평가하였다. 또한 평가한 액성한계를 이용하여 추정된 강도정수(점착력, 내부마찰각)를 유한요소 수치해석에 적용하여 이온농도에 따른 사면의 안정성을 평가하였다. 사면의 안정성 평가에는 강도감소기법(Matsui and San, 1992; Griffiths and Lane, 1999)을 적용하여 파괴 때까지 전단강도를 감소시키면서 수치해석을 수행하였다.

2. 이론적 배경 및 실험방법

2.1 점토광물과 물의 상호작용

점토 입자의 표면은 상쇄되지 않는 전하(uncompensated charge)와 동형치환(isomorphous substitution)에 의하여 일반적으로 음전하를 띠고 있다. 따라서 간극수에 존재하는 양이온(e.g., Na^+ , Ca^{2+})이 점토 표면에 부착되어 간극수와 평형상태를 이루게 된다. 간극수의 이온농도(Ionic concentration, IC)가 높은 경우 부착된 양이온에 의해 점토입자의 이중층 두께는 감소하게 되고 입자간 인력이 증가하게 된다. 반대로 IC가 감소할수록 점토표면의 음이온을 상쇄하기 위하여(평형에 이르기 위하여) 많은 물 분자가 점토입자 주변에 존재하게 되므로 이중층 두께가 증가하게 된다. 증가된 이중층 두께는 점토 입자간의 반발력(repulsion)을 증가시키고 따라서 점토의 지반공학적 물성치(e.g., 투수계수, 간극비, 전단강도)는 점토의 간극수에 큰 영향을 받게 된다. 이는 점토가 포함된 지반에서 지반구조물의 장기적 안정성 평가를 위해서는 이온농도의 영향을 고려하여야 함을 뜻한다.

2.2 소성한계와 액성한계 측정

수축한계(Shrinkage Limit, SL), 소성한계(Plastic Limit, PL), 액성한계(Liquid Limit, LL) 세 가지 한계를 측정하여

Fig. 1. Shrinkage, Plastic, and Liquid Limit of Fine-Grained Soils

애터버그 한계(Atterberg Limits)라고 한다(Fig. 1). 소성한계는 Fig. 1과 같이 반고체상태로부터 소성상태로 변하는 순간의 함수비를 의미하며, 액성한계는 세립토가 소성상태에서 액체와 같이 거동하는 상태로 변하는 시점에서의 함수비를 의미한다. 점토의 액성한계를 측정하는 방법으로는 대표적으로 Casagrande의 방법과 fall cone test이 있는데 본 연구에서는 fall cone test (BS 1377)를 이용하여 이온농도에 따른 점토의 액성한계를 측정하였다.

2.2.1 Fall Cone Test BS 1377, BSI (1990)

본 연구에서 점토의 액성한계를 구하기 위하여 사용한 Fall Cone Test의 낙하 추는 선단각도가 30° , 무게가 80 g인 추를 사용하였으며, 낙하 시간은 5초로 설정하였다. 액성한계는 BS 1377에 따라 추의 관입량 20 mm에서의 함수비로 산정하였고 이를 위하여 총 4번의 함수비에서 관입량을 측정하였다.

이온농도(IC)에 따른 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트의 액성한계를 산정하기 위하여 초순수(DI), 0.01, 0.05, 0.1, 1, 2M의 용액과 건조한 점토시료를 혼합하였으며 이온과 점토입자의 충분한 반응을 유도하고 평형상태에서 액성한계 실험을 수행하기 위하여 각 함수비마다 시료조성 후 2시간 후에 실험을 수행하였다. 이온농도 조절에는 염화나트륨(NaCl)이 이용되었다.

2.2.2 소성한계(ASTM, 2010)

본 연구에서 측정한 소성한계(ASTM D4318-84, 2010)는 반죽된 점토를 손바닥으로 밀어 지름 3.2 mm의 굽기에서 부서지기 시작할 때의 함수비를 통하여 측정하였다. 점토별 두 가지 이온농도 조건(초순수(DI)와 2M NaCl)에서의 소성한계를 3번 측정하여 이의 평균값을 산정하였다. 2M NaCl의 조건 하에서는 점토입자와 Na^+ 이온의 충분한 반응을 유도하고 평형상태 이후에 실험을 수행하기 위하여 실험 수행 전 용액과 점토입자 혼합 후 2시간을 대기하였다.

2.3 강도감소기법 및 수치해석 조건

본 연구에서는 점토지반의 사면안정해석을 위하여 유한요소법(finite element method)을 기반으로 한 COMSOL multiphysics를 이용하였다. 사면안정해석에는 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였으며 Griffiths and Lane (1999)이 제안한 강도감소계수(strength reduction factor, SRF)를 이용한 강도감소기법을 적용하여 사면의 안정성을 평가하였다. 강도감소기법은 사면파괴가 일어날 때까지 지반의 전단강도를 감소시키면서 반복적으로 수치해석을 수행하여 사면의 안정성을 평가하는 방법으로 높은 SRF는 파괴까지의 강도감소비가 큰 것을 의미한다. 따라서 높은 SRF는 안전율이 큰 사면을 의미하게 된다. 본 연구에서는 SRF를 1부터 0.05간격으로 증가시키면서 사면의 파괴가 일어날 때까지 반복계

산을 수행하여 파괴 시 최종 SRF를 주어진 조건에서의 수치 해석 결과값으로 산정하였다. SRF를 이용한 유발 점착력 (c_m)과 내부마찰각(ϕ_m)을 아래 Eq. (1)과 같다.

$$c_m = \frac{c}{SRF}, \quad (1)$$

$$\phi_m = \text{atan}\left(\frac{\tan\phi_u}{SRF}\right)(p < 0) + \text{atan}\left(\frac{\tan\phi_s}{SRF}\right)(p > 0)$$

여기서 c (KPa)는 점토의 점착력, ϕ_u 는 불포화상태에서의 내부마찰각, ϕ_s 는 포화상태에서의 내부마찰각, p (KPa)는 간극수압이다. 따라서 포화상태($\phi_u = 0$)에서의 안전율(FS)은 Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$FS = SRF = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{c + \sigma_n \tan\phi_s}{c_m + \sigma_n \tan\phi_m} \quad (2)$$

Mesh는 COMSOL에서 제공하는 physics-controlled mesh를 이용하였고 degree of freedom = 3,653개, internal degree of freedom = 25,710개였으며 모델은 857개의 triangular elements로 구성되었다(Fig. 2(b)).

(a) Schematic drawing of the slope stability model

(b) Schematic drawing of the meshed model

(c) Contour plot von miss stress

(d) slip surface at maximum of SRF

Fig. 2. Figure of Slope Stability Analysis

3. 물성치 및 수치해석 방법

3.1 점토의 물성치

본 연구에서 실내실험 수행에 이용된 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트의 입도분포곡선은 비중계 실험(ASTM D422)를 통하여 산정하였다. 비중계 실험을 통한 분산제 (dispersant) 하에서 산정된 세 가지 점토시료의 입도분포는 Fig 3과 같다. Fig 3에 나타난 바와 같이 본 연구에서 이용된 점토시료는 대체적으로 큰 입경을 가지는 것으로 나타났다. 벤토나이트의 경우 상대적으로 작은 입자들은 침하속도가 매우 늦기 때문에 실험을 일주일 후에 종료하였다.

본 연구에서는 이온농도에 따른 사면안정성 평가를 위하여 수치해석에 필요한 강도정수를 실내실험으로 산정된 액성한계를 통하여 추정하였다. 점토의 내부마찰각(ϕ_r) 산정은 Kanji (1974)와 Fang et al. (2019)가 제안한 식을 이용하였으며, LL > 100인 벤토나이트는 PI를 이용하는 Kanji (1974)가 제안한 식(Eq. (3))을 이용하였고, LL < 100인 일라이트와 카올리나이트는 Fang et al. (2019)가 제안한 식(Eq. (4))을 이용하였다. Fall cone test를 통해 산정된 이온농도에 따른 액성한계와 소성한계 및 소성지수 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 1에 나타난 바와 같이 산정된 내부마찰각은 일라이트 > 카올리나이트 > 벤토나이트 순으로 나타났다. 또한 세 가지 점토 모두 이온농도가 증가할수록 내부마찰각도 증가하는 경향을 보였다. 이는 이온강도가 클수록 전단강도가 감소하는 기존 문헌의 결과와 일치한다(Anson and Hawkins, 1998). 이온강도 증가는 점토입자의 이중층수 감소를 야기하며 이는 점토입자간의 거리를 더 가깝게 하고 점토입자 응집효과를 증가시킨다.

$$\phi_r = 46.6/PI^{0.446} \quad (3)$$

$$\phi_r = -0.9031LL + 51.726 \quad (4)$$

Fig. 3. Particle Size Distribution of Kaolinite, Illite, and Bentonite Used in this Study

Table 1. Evaluated Plastic and Liquid Limits and Estimated Friction Angle (Fang et al., 2019; Kanji, 1974)

Material	IS	PL (%)	LL (%)	PI (%)	ϕ_r (°)	Note
I	DI	25.56	34.27	8.71	20.78	Eq. (3)
	0.01M	-	34.47	-	20.60	
	0.05M	-	33.2	-	21.76	
	0.1M	-	33.14	-	21.80	
	1M	-	31.54	-	23.24	
	2M	21.79	30	8.21	24.63	
K	DI	29.82	42.64	12.82	13.22	Eq. (2)
	0.01M	-	42.75	-	13.12	
	0.05M	-	41.2	-	14.52	
	0.1M	-	41.06	-	14.65	
	1M	-	38.21	-	17.22	
	2M	25.86	33.69	7.83	21.30	
B	DI	91.3	300.64	209.34	4.30	Eq. (2)
	0.01M	82.01	296.3	214.29	4.25	
	0.05M	75.51	245.54	170.03	4.72	
	0.1M	72.72	201.74	129.02	5.33	
	1M	63.43	98.53	35.10	9.53	
	2M	60.63	85.68	36.43	11.08	

3.2 수치해석 방법

점토별 비중(G_s)은 비중병 실험(ASTM D854)에 의하여 측정된 값을 수치해석에 적용하였다. 또한 Eq. (1)의 ϕ_u 과 ϕ_s 는 같다고 가정하였다. Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 사면의 높이는 15 m, 아랫변과 윗변의 길이는 각각 48 m와 5 m, 배면과 저면의 수위는 각각 10 m와 4 m로 모델링하였다(사면 각도 26.6도). 수치해석은 수리-역학 연계해석 모델을 이용하여 수행하였고 점착력(c)은 25 kPa로 가정하였다. $\phi = 20^\circ$ 일 때 수치해석에 사용된 모델의 mesh와 수치해석이 끝난 상태의 von mises stress분포, 파괴면을 각각 Figs. 2(b), 3(c), 3(d)에 나타내었다. 또한 수치해석에 이용한 점토의 물성치는 Table 2에 나타내었다. Illite와 Kaolinite, Bentonite의 점착력(c)과 탄성계수(E), 포아송비(ν)는 Rayhani and El Naggar (2008)에 제안된 Table 2의 값을 사용하였다.

4. 시험결과 및 수치해석 결과

4.1 액성한계

Fig. 4에 나타난 바와 같이 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트 모두 이온농도가 증가함에 따라 액성한계는 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 같은 함수비에서 이온농도가 클수록 관입량이 더 큰 것을 뜻한다. 점토입자 스케일에서 보면 이온농도가 클수록 점토의 이중층수가 작아지기 때문

Table 2. Material Propertise (Rayhani and El Naggar, 2008)

	Unit Weight (kg/m ³)	c (kPa)	E (MPa)	ν	G_s
Illite	2,890	90	45	0.42	2.89
Kaolinite	2,700	90	45	0.42	2.70
Bentonite	2,680	50	24	0.43	2.68

Fig. 4. Ionic Concentration vs LL of Clay

에 점토 입자 사이의 공간이 낮은 이온농도 보다 상대적으로 크다. 따라서 관입에 저항하는 전단저항력이 이온강도가 큰 경우가 더 적기 때문에 Fig. 4와 같은 실험결과가 관측된 것으로 사료된다. 이는 낮은 이온강도 하에서의 점토지반의 투수계수가 적은 것과 맥락을 같이한다(i.e., 입자사이의 공간이 적기 때문에 간극수의 투수가 어렵다). 또한 낮은 이온농도에서 적은 관입깊이는 주어진 함수비에서 비배수 전단강도(undrained shear strength)가 이온농도가 낮을수록 증가할 것임을 유추 가능하게 한다. 이는 이온농도가 낮을수록 감소하는 배수 전단강도(draind shear strength)의 경향(Calvellido et al., 2005)과는 반대의 경향이다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 본 연구에서 이용한 점토의 액성한계는 벤토나이트 > 카올리나이트 > 일라이트 순으로 나타났다. 또한 벤토나이트의 경우 카올리나이트와 일라이트에 비해 상대적으로 이온농도 변화에 따른 액성한계 감소폭이 더 큰 것을 볼 수 있다. DI에서 2M까지 이온강도가 증가하는 동안 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트의 액성한계 감소비율은 각각 약 17.8, 9.3, 68.4%로 나타났다. 이는 벤토나이트의 매우 큰 비표면적(specific surface (m²/g), 단위 중량 당 표면적)에 기인한다. 큰 비표면적은 단위중량 당 큰 표면전하(surface charge)를 가지고 있음을 의미하고 이는 이온농도 감소에 따른 이중층수의 급격한 감소로 나타난다. 따라서 Fig. 4의 결과는 벤토나이트의 함량이 높은 지반의 경우 투수계수나 전단강도에 따른 지반구조물 설계 시 반드시 이온농도에 의한 영향을 고려하여야 함을 의미한다.

4.2 수치해석 결과

Table 3에 나타난 바와 같이 수치해석 결과를 통하여 점토의 이온농도가 증가함에 따라 사면의 안전율(SRF)은 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이는 이온농도의 감소가 점토를 포함한 지반의 사면안정성 저하를 초래할 수 있음을 의미한다. 본 연구에서 수행한 수치해석 geometry는 상대적으로 안정적이기 때문에 (경사각 19.23°) Table 3의 SRF는 벤토나이트 DI, 0.01M을 제외하고 모두 1.5보다 크게 나타났다. 사면안정에 대한 안전율의 경우 일반적으로 1.5를 이용하기 때문에 본 연구에서 수행된 수치해석 케이스는 이온농도에 관계없이 모두 사면붕괴에 안전하다는 결론이 도출되거나 사면의 경사각이 커지거나 강우를 고려하게 될 경우 안전율이 Table 3에 도출된 결과보다 작아질 것으로 사료되어 1.5보다 작은 안전율이 산출될 가능성이 높다. 특히 낮은 이온농도에서 상대적으로 작은 안전율은 강우 시에 전응력 증가, 침투 및 간극수압 증가를 고려한 안전율의 감소분을 제외하고도 간극수의 이온농도의 감소에 따른 안전율의 감소가 추가적으로 산출될 가능성이 있음을 뜻한다. 특히 이온농도 변화에 민감한 몬모릴로나이트를 포함한 지반의 경우 강우에 따른 간극수의 이온농도 변화를 사면안정 해석에 고려하여야 함을 의미한다.

Fig 5는 이온농도에 따른 주어진 SRF 조건에서 사면 정상에서의 수직변위를 나타내었다. Fig. 5의 SRF값은 Table 3에서 얻어진 각 이온농도의 SRF값을 참조하여 점토별 모든 이온농도에서 파괴가 일어나지 않는 최대 SRF값을 이용하였다.

Table 3. Result of Analysis (Comsol)

	IS	$\phi_r(^{\circ})$	SRF
Illite	DI	20.777	3.1
	0.01M	20.596	3.08
	0.05M	21.763	3.135
	0.1M	21.797	3.145
	1M	23.242	3.195
	2M	24.633	3.275
Kaolinite	DI	13.218	2.905
	0.01M	13.118	2.895
	0.05M	14.518	2.96
	0.1M	14.645	2.965
	1M	17.219	3.065
	2M	21.301	3.26
Bentonite	DI	4.298	1.49
	0.01M	4.254	1.49
	0.05M	4.716	1.505
	0.1M	5.334	1.535
	1M	9.532	1.705
	2M	11.079	1.765

Fig 5에 나타난바와 같이 전체적으로 이온농도가 낮을수록 수직변위에 더 취약한 결과를 볼 수 있다(음의 수직변위는 깊이방향을 뜻한다). 특히 모든 점토에서 이온농도가 0.01M 이상일 때 변위값의 변화가 더 두드러지게 나타났고 1M과 2M의 변위차이는 상대적으로 미미하였다. 이는 저수지 필름과 같은 일반적인 지하수 조건(< 0.01M)에서 이온농도에 따른 사면의 변위는 미미하지만 해수(-0.6M)와 인접한 지역(해안가)에서의 사면의 수직변위 변화는 상대적으로 클 수 있음을 의미한다.

Fig. 6은 4가지 SRF 값에서 DI와 2M 벤토나이트 사면의 변위값(Total displacement)을 나타낸다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 DI의 경우 SRF = 1.5에 도달하지 못하고 변위가 크게 발생하면서 수치해석이 종료되는 것을 볼 수 있는 반면 DI의 경우 상대적으로 큰 SRF값인 1.765에서 큰 변위가 발생하면서 수치해석이 종료되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 Table 3에 산정된 SRF 값들의 산정 과정을 보여준다.

(a) Illite at SRF = 3

(b) Kaolinite at SRF = 2.65

(c) Bentonite at SRF = 1.45

Fig. 5. Vertical Displacement at the Top

Fig. 7은 6~11 m의 수위차이(dH)에 따른 3가지 점토의 SRF값의 변화를 DI와 2M에 대하여 나타내었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 수두차가 증가할수록 DI와 2M 모두에서 SRF (안전율)이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 또한 Fig.

(a) Displacement contour of 2M Bentonite at SRF 1.5~1.765

(b) Displacement contour of DI Bentonite at SRF 1.25~1.49

Fig. 6. Total Displacement

(a) SRF by dH of DI

(b) SRF by dH of 2M

Fig. 7. SRF vs dH

8에 나타난 바와 같이 수두차와 관계없이 세 가지 점토 모두 이온강도가 증가할수록 SRF값이 증가하는 경향이 나타났다. dH = 6 m의 조건에서 DI와 2M의 SRF값을 비교하였을 때 SRF 증가율은 illite, kaolinite, bentonite 순으로 각각 6, 11.8 17.3%로 나타났고 이는 사면의 안전율이 illite < kaolinite < bentonite 순으로 이온농도에 크게 영향을 받음을 뜻한다. 같은 방법으로 dH = 8 m와 10 m에서의 SRF 증가율은 각각 5.9, 11.6, 16.5%와 5.3, 10.9, 15.6%로 산정되었고 이는 이온강도 증가에 따른 안전율의 증가율은 수두차와 큰 관련이 없음을 의미한다.

본 연구에서 수행된 수치해석결과는 점토가 100%인 경우 산정된 액성한계 값을 기반으로 수행되었기 때문에 점토 함량이 적은 저수지와 같은 실제 현장에서의 이온농도에

(a) SRF at dH = 10 m

(b) SRF at dH = 8 m

(c) SRF at dH = 6 m

Fig. 8. SRF vs IC According to Water Level

다른 안전율 평가를 위해서는 점토 함량에 따른 액성한계 실험과 수치해석을 수행해야 될 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 이온농도에 따른 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트의 액성한계를 fall cone test를 이용하여 측정하고 결과를 고찰하였다. 또한 산정된 액성한계 값을 이용하여 각 이온농도 조건에 따른 점토의 내부마찰각을 추정하고 이를 통하여 이온농도에 따른 사면의 안전율 변화에 대하여 고찰하였다. 사면의 안전율은 수치해석 프로그램인 Comsol Multiphysics를 이용하여 산정하였고 강도강소기법을 적용하여 파괴시까지 반복적으로 사면안정해석을 수행하여 안전율을 도출하였다. 본 연구를 통하여 도출된 주요 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 모든 점토에서 이온농도가 커짐에 따라 액성한계가 감소하였다. 이는 이온농도가 커짐에 따라 점토의 이중층수가 감소하여 같은 함수비에서 콘의 관입에 대한 전단저항이 상대적으로 적음을 뜻한다.
- (2) 경험식을 통하여 산정된 내부마찰각은 이온강도가 감소할수록 감소하는 경향을 보였다. 따라서 이를 적용한 수치해석 결과로 도출된 사면의 안전율은 이온강도가 감소할수록 감소하는 것으로 나타났다. 이는 이온강도 변화에 민감한 점토를 포함한 지반의 사면안정해석 시, 강우나 간극수 흐름에 따른 이온강도 변화를 고려하여야 함을 뜻한다.
- (3) 수치해석을 통하여 산정된 사면정상에서의 이온강도에 따른 지반의 수직변위는 이온농도가 0.01M 이상일 때 변위값의 변화가 더 두드러지게 나타났다. 하지만 1M과 2M의 수직변위차이는 상대적으로 미미하였다. 이는 특히 해수와 인접한 지역에서의 점토가 함유된 지반의 사면의 수직변위 변화 예측에는 간극수의 화학적 성질이 동반되어야 함을 의미한다.

References

Anson, R.W.W., and Hawkins, A.B. (1998). The effect of calcium ions in pore water on the residual shear

- strength of kaolinite and sodium montmorillonite. *Geotechnique*, Vol. 48, No. 6, pp. 787-800.
- ASTM, D. (2010). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. D4318-10.
- BSI (1990). *Methods of test for soils for civil engineering purposes*. BS 1377.
- Calvello, M., Lasco, M., Vassallo, R., and Di Maio, C. (2005). Compressibility and residual shear strength of smectitic clays: influence of pore aqueous solutions and organic solvents. *Italian Geotechnical Journal*, Vol. 1, No. 2005, pp. 34-46.
- Fang, C., Shimizu, H., Nishimura, S., and Nishiyama, T. (2019). Predicting the residual frictional angle by Atterberg limits for reservoir embankment soils. *Int. J. GEOMATE*, Vol. 17, No. 63, pp. 111-118.
- Griffiths, D.V., and Lane, P.A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, Vol. 49, No. 3, pp. 387-403.
- Heo, G., and Chung, C.-K. (2019). Quantification on Dam Condition Related to Internal Erosion of an Embankment Dam and its Applicability Evaluation. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 35, No. 4, pp. 5-14.
- Kanji, M.A. (1974). The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils. *Geotechnique*, Vol. 24, No. 4, pp. 671-674.
- Matsui, T., and San, K.C. (1992). Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. *Soils and foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 59-70.
- Rayhani, M.H., and El Naggar, M.H. (2008). Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil. *International Journal of Geomechanics*, Vol. 8, No. 6, pp. 336-346.

Received	July 22, 2021
Revised	July 22, 2021
Accepted	August 5, 2021