

일라이트와 카올리나이트의 침강 및 자중압밀 특성

Sedimentation and Self-Weight Consolidation Characteristics of Illite and Kaolinite Suspension

안정민* · 최현준** · 이석재*** · 원종묵****

An, Jeongmin*, Choi, Hyun-Jun**, Lee, Seokjae***, and Won, Jongmuk****

Abstract

In this study, we performed one dimensional cylindrical sedimentation tests to investigate the impact of clay mineralogy, ionic concentration, ionic valence on sedimentation, and self-consolidation behavior of clay. The result at 1,000% and 2,000% water content indicates that the water content = 2,000% showed higher self-consolidation coefficient and initial settling velocity, and faster initiation and termination of self-consolidation. Additionally, settling velocity decreased as ionic concentration (0.01 - 2 M) increased, and kaolinite showed higher settling velocity than illite. The observed sedimentation and self-consolidation experimental results implies the need for considering clay mineralogy, water content, ionic concentration, and ionic valence in the geotechnical behavior of high-water content clay sediment.

Key words : Water Content, Ion Concentration, Ionic Valence, Self-weight Consolidation, Sedimentation

요 지

본 연구에서는 함수비와 이온영향인자(이온농도, 이온가수)에 따른 점토(일라이트, 카올리나이트) 슬러리의 침강 및 자중압밀 특성을 평가하기 위하여 실린더 침강실험을 수행하였다. 함수비 1,000%, 2,000%에서의 침강 및 압밀거동을 분석한 결과 1,000%에 비해 2,000%에서 침강압밀계수, 초기침강속도가 크게 산정되었으며, 자중압밀 시점 및 종점이 빠른 경향을 나타내었다. 또한 이온농도 0.01~2 M 범위에서 침강속도를 비교한 결과 이온농도가 증가함에 따라 점토의 침강속도가 감소하는 경향을 나타내었고, 카올리나이트가 일라이트에 비하여 빠른 초기침강속도를 보였다. 본 연구에서 관찰된 침강 및 자중압밀 거동은 고함수비의 점토에 대한 지반공학적 거동을 평가할 때 점토광물, 함수비, 이온농도, 이온가수를 고려해야 함을 보여준다.

핵심용어 : 함수비, 이온농도, 이온가수, 자중압밀, 침강

1. 서 론

무역항 및 연안항에서는 시간이 지남에 따라 고함수비의 흙이 퇴적되어 수위가 증가하게 된다. 이는 선박들의 자유로운 입출항에 제약을 발생시키며 사회·경제적으로 피해를 유발한다. 따라서 선박의 안정적인 접안을 위하여 펌프를

이용하여 퇴적된 흙을 지속적으로 제거함으로써 무역항 및 연안항의 일정한 수위를 유지해야 한다(Ministry of Oceans and Fisheries, 2004). 펌프로 이송된 퇴적된 흙은 함수비가 매우 큰 초연약상태(슬러리 형태)로 존재하기 때문에 장시간의 침강시간이 소요되고 침강완료 후 자중침하가 발생하게 된다(Lee et al., 1994). 해안에서의 준설토는 점토

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

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

**한국건설기술연구원 북방인프라특화팀 박사후연구원(E-mail: hjchoi90@kict.re.kr)

Post Doctoral Researcher, Northern Infrastructure Specialized Team, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***정회원, 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구센터 연수연구원(E-mail: liontjrwo@kiost.ac.kr)

Post Doctoral Scientist, Coastal Development and Ocean Energy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST)

****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

질인 경우가 대부분이기 때문에 점토의 성질이나 클러스터의 크기가 침강시간에 큰 영향을 미치게 된다(Lee et al., 2008).

Van Olphen (1977)는 점토 클러스터가 주로 입자의 크기와 모양, 간극수에 따라 다르게 형성됨을 규명하였다. 또한 점토 입자구조를 크게 Edge-to-face (EF)와 Face-to-face (FF)로 분류하였다. EF는 점토의 모서리와 면 사이의 강한 인력에 의하여 입자들이 붙어서 생성된 면모구조(Flocculation)이며, FF는 점토의 면과 면 사이의 인력이 우세하여 면끼리 결합된 이산구조(Dispersion)이다. 카올리나이트의 경우 pH 4-7, 이온농도 0.1~0.15 mol/L에서 EF의 구조를 나타냈으며, 이온농도 > 0.1~0.15 mol/L 일 때 FF 구조를 나타나는 것으로 보고되었다(Palomino and Santamarina, 2005).

Imai (1980)에 따르면 액상점토의 침강형태는 분산침강, 응집침강, 구간침강, 압밀침강 4단계로 존재한다. 이 연구에서는 점토의 종류, 함수비, 염분농도에 따라 4가지의 침강형태 중 한 가지의 침강형태가 나타나고 점토의 응집정도에 따라 침강형태가 달라지는 것으로 나타났다. 따라서 점토의 침강거동에 이온농도는 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

Yano (1985)의 실험적 연구는 국내에서는 Yano방법이라 통칭하면서 많은 연구에서 준설토의 침강 및 자중압밀 평가에 적용되었다. 준설토의 침강 및 자중압밀 특성은 준설토의 매립지 형성에 핵심적인 공학적 특성으로 Yano방법에서는 실내실험을 수행하여 자중압밀의 시점과 종점을 측정하고, 이를 통하여 침강압밀계수를 산정한 후 준설토매립지의 자중압밀 종료시점을 추정하였다.

Lee et al. (2009)에 따르면 준설토의 종류나 매립규모에 따라 최소 수개월에서 수년의 시간이 소요되기 때문에 준설토의 침강압밀계수 산정을 통하여 자중압밀 촉진방안을 수립한 뒤 준설토 매립공사 기간을 단축시키는 것이 중요하다. 위의 연구들은 침강속도와 침강압밀계수 산정의 중요성을 나타낸다. 하지만 이온가수와 점토의 광물특성이 침강 및 자중압밀에 끼치는 영향에 대한 추가적인 고찰이 필요하다.

우리나라 서해안과 남해안의 준설토에는 각각 카올리나이트와 일라이트가 많이 포함되어 있다(Kim et al., 2001). 따라서 본 연구에서는 카올리나이트와 일라이트를 이용하여 실내침강실험을 수행하고 수행된 실내실험을 통하여 함수비와 이온영향인자에 따른 점토슬러리의 자중압밀 시점 및 종점, 침강압밀계수와 초기침강속도를 산정하였다. 또한 관측된 실험결과를 통하여 해안 준설토의 침강 및 자중압밀 특성에 대해 논의하였다.

2. 이론적 배경

2.1 침강압밀 특성(Imai, 1980)

Imai (1980)는 점토의 침전과정을 점토의 종류, 함수비, 이온농도 등에 따라 분산침강, 응집침강, 구간침강, 압밀침강 4단계로 구분하였다(Table 1). Table 1에 나타난 바와

같이 점토의 분산침강(Type 1)은 점토 입자간의 상호작용과 응집이 모두 발생되지 않고 독립적인 입자들의 자유침강이 발생함을 뜻한다. 응집침강(Type 2)은 점토 입자 간의 인력으로 인해 서로 다른 크기의 점토 클러스터를 형성하여 상대적으로 큰 점토 클러스터의 침강속도가 크고 정확한 경계면이 형성되지 않는 것을 뜻한다. 구간침강(Type 3)의 경우 점토 클러스터 형성과 동시에 클러스터 간 상호작용으로 인하여 주어진 조건에서 점토 클러스터가 비슷한 침강속도를 보이며 침강 시에 확실한 경계면이 형성된다. 마지막으로 압밀침강(Type 4)은 점토 클러스터가 눈에 띄지 않고 점토의 자중으로 인하여 침강이 일어나는 것을 뜻한다.

구간침강의 전형적인 침강곡선은 Fig. 1에서와 같이 시간에 따라 응집(Flocculation), 침강(Settling), 압밀(Consolidation)

Table 1. Distinctive Features of Typical Settling Type for Clay Materials (Imai, 1980)

Settling type	Designation	Distinctive features
I	Dispersion settling	Soil particles do not flocculate but disperse, and freely settle without interaction.
II	Flocculation settling	Soil particles are freely formed and flocculated according to various sizes. No exact interface is formed.
III	Zone settling	Flocs are formed due to flocculation and they settle with the strong interaction. An accurate interface is formed and the sedimentation speed is constant.
IV	Consolidation settling	Visible flocs are not formed. A mixture settle as a whole mainly due to the consolidation.

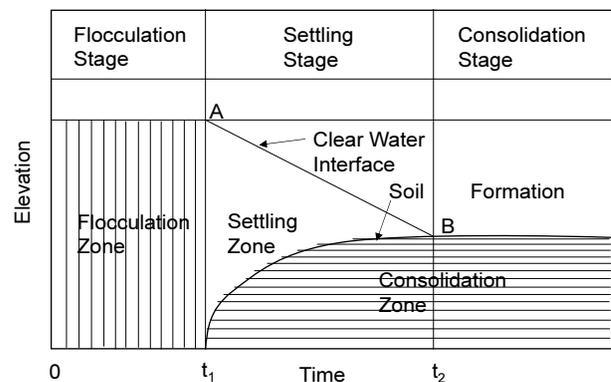


Fig. 1. Typical Sedimentation Curve of Sedimentation (Imai, 1981)

의 세 단계로 구분할 수 있다(Imai, 1981). 먼저 점토 입자가 클러스터를 형성하고 간극수와 평형을 이루는데 걸리는 시간(t_1)까지를 응집(flocculation stage)으로 볼 수 있다. 그 이후 점토 클러스터의 침강이 완료(t_2)되고 압밀 단계가 시작되기 이전을 침강단계(settling stage)라고 한다. 일정 시간이 경과되면 계면고가 거의 변하지 않는 Creep 거동을 보이는 단계에 접어들게 되는데 그 단계를 압밀단계(consolidation stage)라 한다. 본 연구에서는 점토 클러스터의 침강단계에서 압밀단계까지 걸리는 시간(t_2)을 산정하였다.

2.2 자중압밀 시점 및 종점, 침강압밀계수 산정 (Yano, 1985)

준설토의 침강에서는 Fig. 2와 같이 시간에 따른 계면고 변화가 나타나며 침강(settling) 및 압밀침강(consolidation)의 과정을 거치게 된다. 이때 점토 클러스터의 침강으로 인하여 상등액(supernatant)과 현탁액(suspension) 사이의 경계면(계면고)이 형성된다. 상대적으로 큰 점토 클러스터가 하부에 퇴적되고 계면고와 퇴적된 점토의 높이가 일치되면 침강단계가 종료된다. 침강이 종료된 후, 자중에 의한 압밀침강이 진행되며 이 시점에서의 시간은 t_2 , 계면고는 H_{t_2} 이다. 또한 압밀단계가 지나면 침강속도가 매우 느린 크리프(creep) 형태의 침강이 시작되며 이 시점은 t_{100} , 이때의 계면고는 $H_{t_{100}}$ 이다(Fig. 2). 침강퇴적단계와 자중압밀단계의 구분은 유효응력의 존재 유무로 결정되지만, 실제로 이것을 측정하는 것은 매우 어려우므로 일반적으로 시간($\log(t)$) - 침하량(H) 곡선을 작도 후 일직선이 시작되는 부분을 자중압밀의 시점(t_2)으로 결정하고, 일직선이 끝나는 부분을 자중압밀의 종점(t_{100})으로 결정한다(Yano, 1985).

본 연구에서는 침강압밀과정에서 Eq. (1)과 같이 자중압밀의 시점 및 종점을 연결하고 연결선의 기울기로부터 침강압밀계수(C_s)를 산정하였다.

$$C_s = \frac{\log(H_{t_2}/H)}{\log(t/t_2)} \quad (1)$$

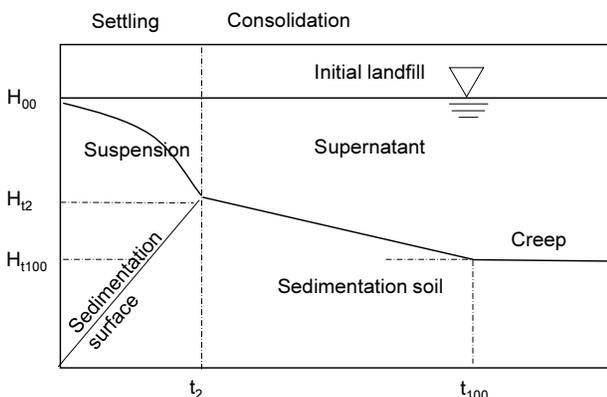


Fig. 2. Typical Process of Settling and Self-Consolidation (Yano, 1985)

여기서, H_{t_2} 는 시간 t_2 일 때의 계면고 높이이다.

2.3 초기침강속도 산정

본 연구에서 초기침강속도(V_i)는 침강압밀곡선의 초기 계면고(H_{00})와 침강종료시점, 즉 자중압밀 시점(t_2)에서 계면고 간의 기울기로서 Eq. (2)와 같이 산정하였다(Yano, 1985).

$$V_i = \frac{(H_{00} - H_{t_2})}{t_2} \quad (2)$$

Kim (1987)은 서해안 점토를 이용한 침강실험에서 초기함수비가 증가함에 따라 초기침강속도가 증가함을 관찰하였다. 이는 초기 함수비와 초기침강속도가 양의 상관관계를 가짐을 의미한다.

3. 실험시료 및 실험방법

3.1 시료특성 및 실험조건

본 연구에서는 #200번체를 통과한 일라이트(메덱스)와 카올리나이트(낙우산업)를 침강실험에 이용하였다. 비중계를 이용한 입도분포곡선 산정 결과(Fig. 3) 입자중간크기(d_{50})은 각각 $8.1 \mu\text{m}$, $7.8 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 본 연구에 이용한 일라이트와 카올리나이트의 물성치는 Table 2에 나타내었다(Kim and Won, 2021).

본 연구에서는 이온농도, 이온가수, 함수비에 따른 침강

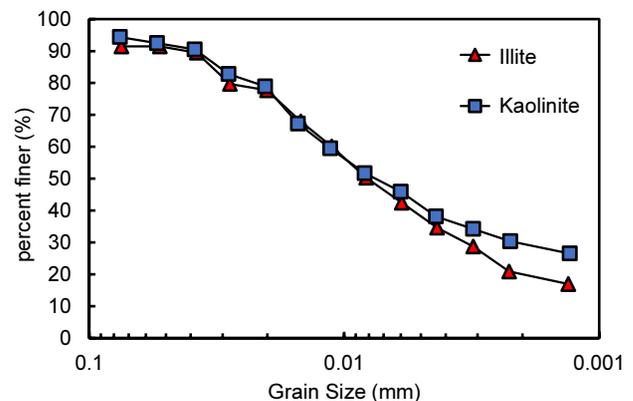


Fig. 3. Particle Size Distribution of Illite and Kaolinite

Table 2. Properties of Clay Used in this Study

Clay	Liquid limit, LL (%)	Plastic limit, PL (%)	Specific gravity, Gs	Average diameter, d_{50} (μm)
Illite	34.17	24.47	2.89	8.1
Kaolinite	41.77	31.20	2.70	7.8

및 자중압밀 특성을 산정하기 위하여 5가지 이온농도(0.01 M, 0.05 M, 0.1 M, 1 M, 2 M), 2가지 이온가수(NaCl (1가), CaCl₂ (2가)), 2가지 함수비(1,000%, 2,000%)의 조건에서 실내침강실험을 수행하였다. 또한 초순수(DI)에 분산제(Na₂PO₃)₆를 첨가한 실험을 수행하여 점토입자의 응집 시의 침강 특성과 비교하였다. 위의 실험조건들은 고함수비 형태인 준설토의 특성을 반영하고 해안매립지에서의 침강 및 자중압밀 특성을 고려하기 위하여 설정되었다.

3.2 실험 기구 및 방법

본 연구에서는 이온영향인자에 따른 점토슬러리의 침강 및 자중압밀 특성을 파악하기 위하여 직경 26 mm, 높이 240 mm로 이루어진 7개의 병렬형태(좌측부터 (NaPO₃)₆, DI, 0.01 M, 0.05 M, 0.1 M, 1 M, 2 M (Fig. 4)) 100 ml 투명 유리 실린더를 이용하여 점토슬러리의 침강거동을 조사하였다. 1,000%와 2,000%의 함수비 조건은 각각 흙시료(g) : 전해질 용액(mL) = 10 : 100, 5 : 100의 무게 비율로 구성되었다. 침강압밀 실험진행 과정은 Lee and Lee (2011)을 참고하여 수행하였다. 투명 실린더 전면에 (NaPO₃)₆, DI, 0.01 M, 0.05 M, 0.1 M, 1 M, 2 M의 건축지를 부착 후 실험조건별 용액을 제조하였다. 그 후 제조된 용액에

점토시료를 투여한 후 유연필름을 이용하여 상하로 10~15회 충분히 시료를 혼합시키고 전면에 설치된 카메라를 이용하여 24시간 촬영하였다(1,200만 화소, 셔터속도 2초). 사진은 0~30분까지 2초 간격, 30분~1시간까지 5분 간격, 1시간~24시간까지 10분 간격으로 촬영하였다. 촬영된 사진을 이용하여 시료의 초기높이와 시간에 따른 계면고를 육안으로 측정하였다. Figs. 4(a) and 4(b)는 NaCl을 이용한 함수비 1,000%의 조건에서 각각 교반 직후와 10분 경과 후의 일라이트의 실험사진이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 실린더 상부에 유연필름을 부착하여 실험시간 동안 수분의 증발을 최소화하였다.

3.3 실험결과 분석(침강속도)

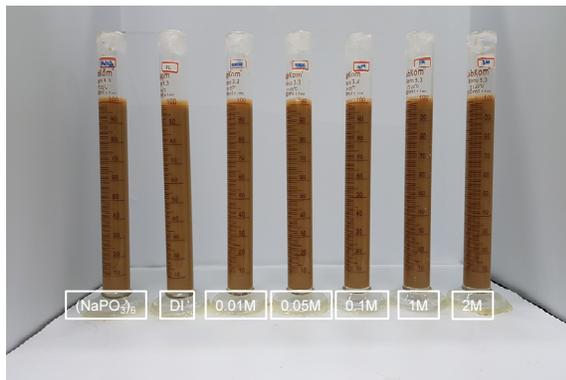
본 연구에서는 점토의 종류와 함수비에 따른 침강속도 변화를 산정하기 위하여 5가지 이온농도(0.01 M, 0.05 M, 0.1 M, 1 M, 2 M)의 초기 계면고(H₀₀)와 침강이 종료되는 자중압밀 시점(H_∞)의 평균값을 이용하여 평균침강속도(V_{avg})를 산정하고 비교하였다. 또한 모든 실험에 대해 침강 곡선의 기울기가 급격하게 변하는 시점(침강이 시작되는 시점)과 침강진행의 중간지점(침강이 빠르게 진행되는 시점)에서 침강속도를 평가하기 위하여 바닥으로부터 16 cm (V_{16cm}), 8 cm (V_{8cm})에 도달하는 속도를 산정하였다. 버니어 캘리퍼스를 통해 실린더의 눈금 당 길이를 산정함으로써 계면고의 높이를 산정하였다.

4. 실험 결과

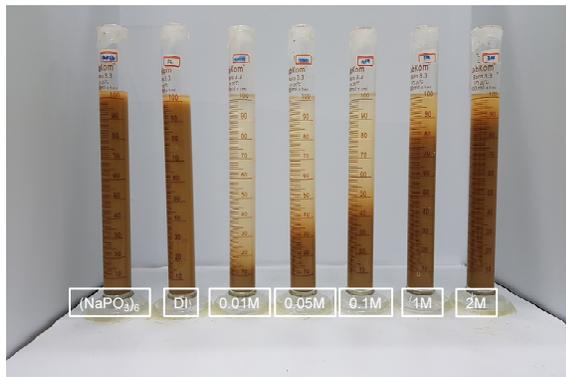
4.1 침강압밀곡선과 침강속도

Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 분산제를 첨가한 경우와 DI의 경우 침강이 미미하게 발생하였다. 이는 두 가지 용액에서 점토입자 간의 응집이 거의 발생하지 않고 자유침강을 하기 때문으로 사료된다. 반면 DI에 비해 상대적으로 빠른 침강속도가 산정된 0.01 M, 0.05 M, 0.1 M 조건에서는 이중층수(Diffuse Double Layer)가 이온농도 증가에 의해 감소하고 따라서 점토입자가 응집됨에 따른 클러스터가 형성됨을 알 수 있다. 특히, Fig. 4(b)를 통하여 0.01 M, 0.05 M, 0.1 M 순서로 침강속도가 계단식으로 증가되는 응집침강이 발생됨을 확인할 수 있다(Flocculation settling in Table 1). 또한 상대적으로 높은 1 M, 2 M의 이온농도에서 점토의 DDL이 감소하고 점토입자의 응집이 발생하지만 낮은 침강속도는 상대적으로 작은 점토 클러스터의 크기가 형성되었음을 의미한다. 따라서 이온농도 > 1 M에서는 점토의 침강이 제한적으로 발생하는 구강침강을 확인할 수 있다(Zone settling in Table 1). Fig. 4(b)에 나타난 높은 이온농도에서의 낮은 침강속도는 Mehta and Hwang (1989)의 연구결과와 유사한 경향을 나타내었다.

시간에 따른 계면고 측정 결과 Figs. 5와 6에 나타난 바와

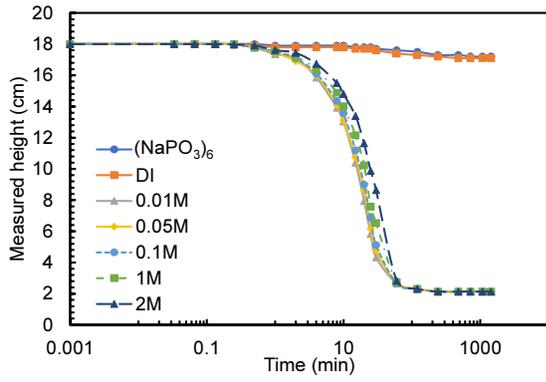


(a) Immediately after setup

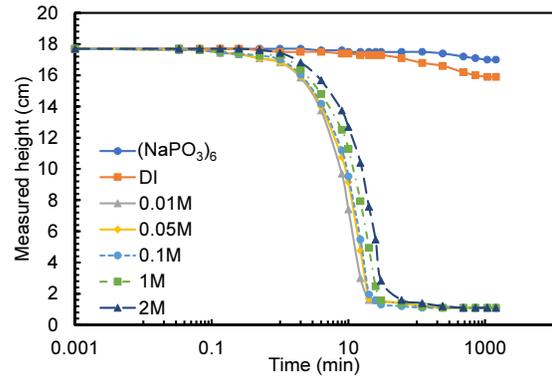


(b) Elapsed time of 10 minutes

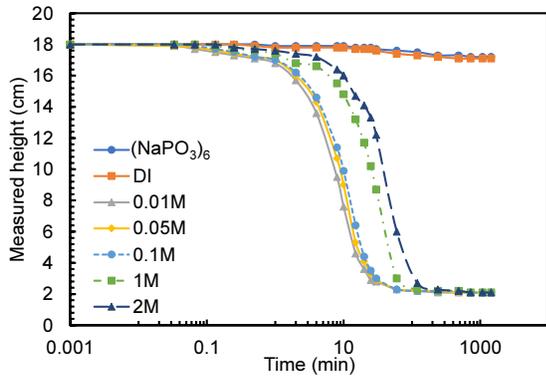
Fig. 4. Pictures of Sedimentation Test at Water Content 1,000% for Ionic Concentration Ranged from ~0 to 2 M (NaCl)



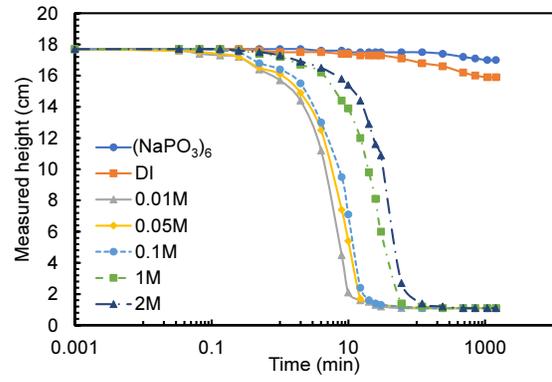
(a) Illite (NaCl)



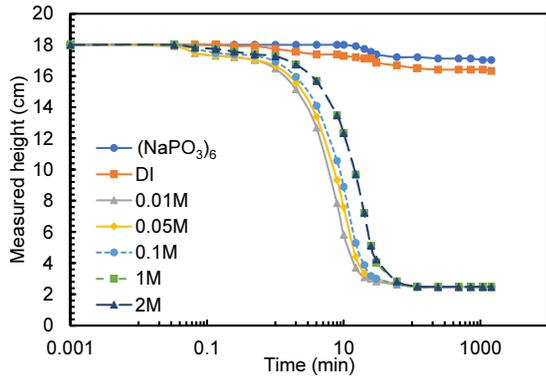
(a) Illite (NaCl)



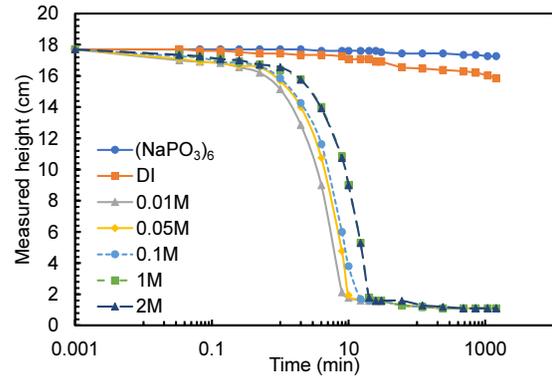
(b) Illite (CaCl₂)



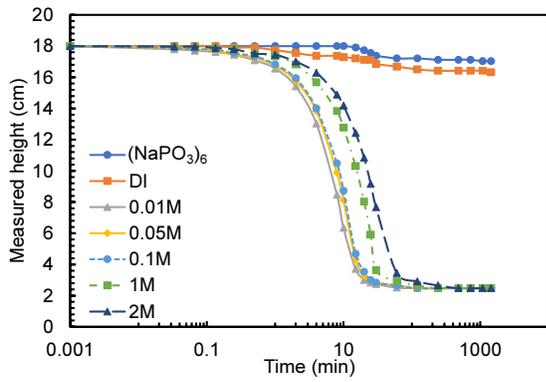
(b) Illite (CaCl₂)



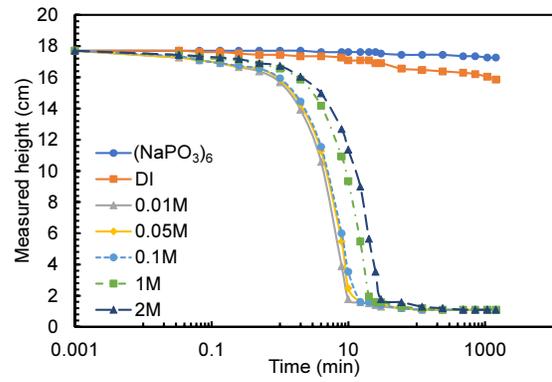
(c) Kaolinite (NaCl)



(c) Kaolinite (NaCl)



(d) Kaolinite (CaCl₂)



(d) Kaolinite (CaCl₂)

Fig. 5. Sedimentation Curve at Water Content of 1,000%

Fig. 6. Sedimentation Curve at Water Content of 2,000%

같이 함수비 1,000%, 2,000% 조건에서 카올리나이트가 일라이트에 비해 빠른 침강속도를 보이는 것으로 나타났다. 특히 NaCl 용액에 투입된 카올리나이트의 경우 1 M과 2 M 조건에서 유사한 침강곡선이 관측되었다(Figs. 5(c) and 6(c)). 이는 상대적으로 높은 이온농도(이온농도 > 1 M)에서 이온농도에 관계없이 유사한 침강거동이 발생되었음을 의미한다. 대조적으로 1 M CaCl₂ 용액에 투입된 카올리나이트가 2 M의 경우보다 더 빠른 침강거동을 보였으며 이는 용액의 이온가수(1가 또는 2가)가 카올리나이트의 침강거동에 영향을 끼침을 보여준다.

주어진 시간에서 NaCl과 CaCl₂ 용액에 대한 계면고의 차이는 1,000%와 2,000%의 함수비 조건에서 모두 일라이트가 카올리나이트보다 더 크게 나타났다(Figs. 5 and 6). 또한 두 가지 함수비에서 일라이트의 경우 0.01~2 M까지의 NaCl 농도 변화에 따른 침강거동은 상대적으로 큰 차이를 보이지 않은 반면(Figs. 5(a) and 6(a)) CaCl₂ 농도 변화에 따른 침강거동은 매우 큰 차이를 보였다(Figs. 5(b) and 6(b)). 이는 일라이트가 카올리나이트보다 이온가수의 증가에 따라 더 민감하게 반응함을 뜻한다.

초기 계면고(H₀₀)에서 자중압밀 시점(t₂)간의 기울기를 이용하여 0.01 M에서 2 M의 이온농도에 대한 평균 침강속도(V_{avg})를 Fig. 7에 나타내었다. 본 연구에서 수행한 실내실험은 함수비 1,000%일 때 평균 침강속도 0.255 cm/min~0.578 cm/min, 함수비 2,000%일 때 평균 침강속도 0.345 cm/min~0.891 cm/min로 함수비가 증가할수록 평균 침강속도가 증가하는 경향이 나타났다. 이는 Kim (1987)의 연구결과와 유사한 경향을 나타낸다. Fig. 7에 나타난 결과를 통하여 함수비가 큰 경우 입자의 응집이 더 활발하게 발생함을 의미하지만 함수비가 매우 클 경우 현탁액 내 점토입자의 밀도가 줄어들어 침강속도가 감소할 가능성이 있다. 따라서 함수비 2,000% 이상에서 추가적인 실험 수행을 통한 함수비에 따른 평균침강속도 산정이 요구된다.

Fig. 7의 결과는 카올리나이트가 일라이트에 비해 상대적으로 큰 침강속도가 산정되었음을 나타낸다. 이는 카올리나이트 입자가 일라이트 입자보다 더 가볍지만(Table 2) 본 연구에서 수행한 0.01 M에서 2 M의 이온농도범위에서 더 높은 응집정도를 보임을 나타낸다. 이는 계면고 8 cm와 16 cm 도달 시의 각각의 이온농도에서 침강속도를 산정한 Figs. 8과 9에서도 확인할 수 있다.

Figs. 8과 9는 각각 침강압밀곡선에서 기울기가 급격하게 변하는 지점인 계면고 16 cm를 기준으로 산정된 속도(V_{16cm})와 자중압밀이 시작되는 지점 직전인 계면고 8 cm를 기준으로 산정된 속도(V_{8cm})를 나타내었다. Figs. 8과 9에 나타난 바와 같이 이온농도가 증가할수록 침강속도는 감소하였다. 점토의 이중층수 두께는 이온농도가 높아짐에 따라 감소하고 이는 점토입자간의 인력을 증가시키기 때문에 -0 M (DI)에서 0.01 M로 이온농도가 증가함에 따라 점토의 침강속도

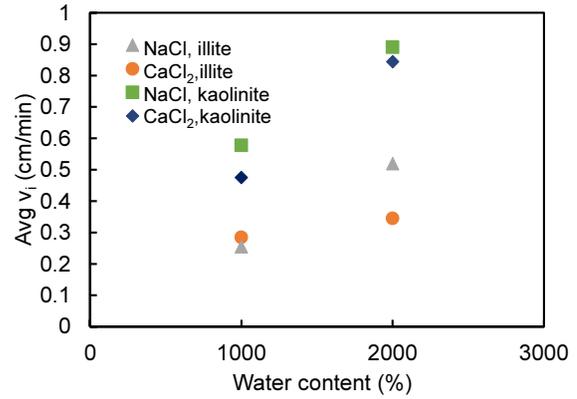
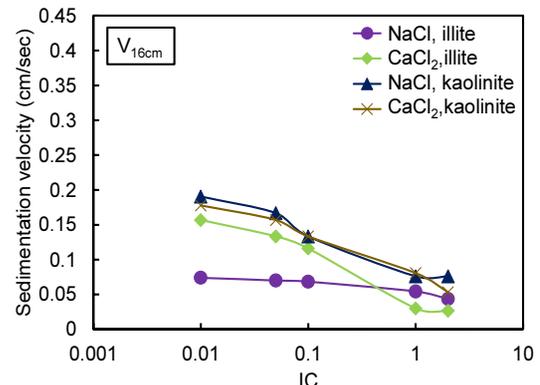
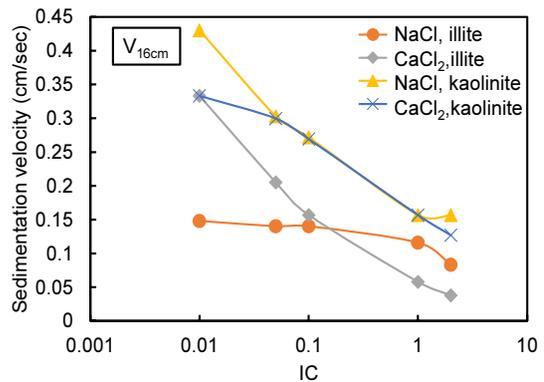


Fig. 7. Average Initial Velocity of Sedimentation Test



(a) Water content = 1,000%

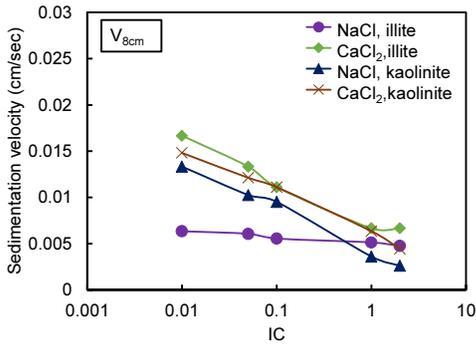


(b) Water content = 2,000%

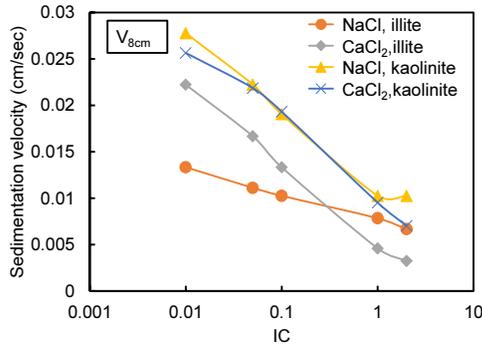
Fig. 8. Settling Velocity Corresponding to 16 cm Height of Cylinder at the Water Content of 1,000 and 2,000%

가 크게 증가하였다(Figs. 4(b), 5, and 6). 하지만 Figs. 8과 9의 결과는 0.01 M에서 2 M의 이온농도범위에서 이온농도가 높아짐에 따라 점토 클러스터의 크기가 감소함을 의미한다. 이는 점토입자간의 인력증가가 반드시 점토 클러스터의 크기 증가로 이어지지 않음을 의미한다.

Palomino and Santamarina (2005)는 실험을 통하여 이온농



(a) Water content = 1,000%



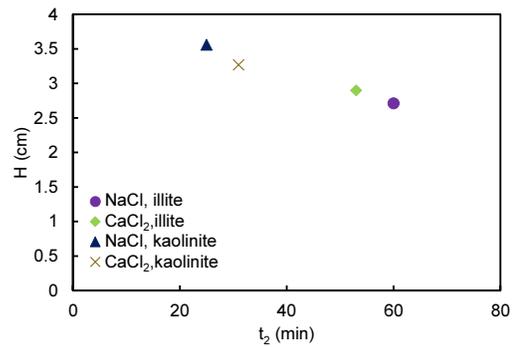
(b) Water content = 2,000%

Fig. 9. Settling Velocity Corresponding to 8 cm Height of Cylinder at the Water Content of 1,000 and 2,000%

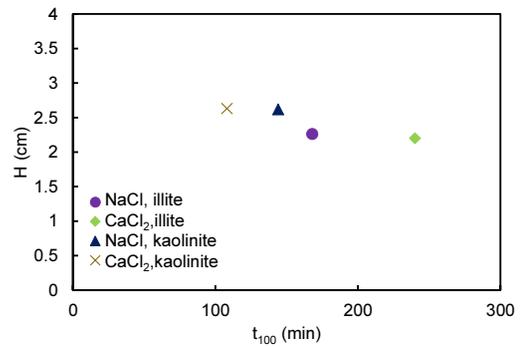
도 0.1 M 이상 조건에서 카올리나이트의 결합구조가 EF에서 EE로 변화함을 규명하였다. 0.01 M에서 2 M의 이온농도범위에서 점토입자 간의 인력이 증가함에도 불구하고 클러스터의 크기가 감소하는 것은 본 연구에서 이용한 점토의 결합구조가 점차적으로 EF (0.01 M)에서 EE (2 M)로 변하는 것을 시사하고 EF 결합의 경우 클러스터가 EE 결합보다 크게 형성되는 것을 의미한다. 특히 Palomino and Santamarina (2005)에서 이용된 카올리나이트는 초순수에서 가장 큰 클러스터를 형성하였지만 본 연구에서 이용된 카올리나이트의 경우 초순수에서 거의 응집이 나타나지 않았다(Fig. 5). 이는 카올리나이트의 광물학적 특성에 따라 응집의 거동이 달라질 수 있음을 의미한다.

4.2 침강압밀계수

Figs. 10과 11은 Yano (1985)으로 침강압밀곡선을 통해 산정된 자중압밀의 시점 및 종점을 나타낸다. 자중압밀의 시점은 $\log(H(\text{계면고})) - \log(t)$ 곡선에서 초기 변곡점으로 결정하였으며, 종점은 크리프변형이 시작되는 지점으로 결정하였다. 본 연구에서 수행한 실험의 자중압밀 시점 및 종점은 Yano (1985)의 연구결과와 동일하게 함수비가 높을수록 자중압밀의 시점 및 종점이 빠른 경향을 나타내었다. 또한 동일한 조건의 함수비, 이온가수, 이온농도에서 카올리

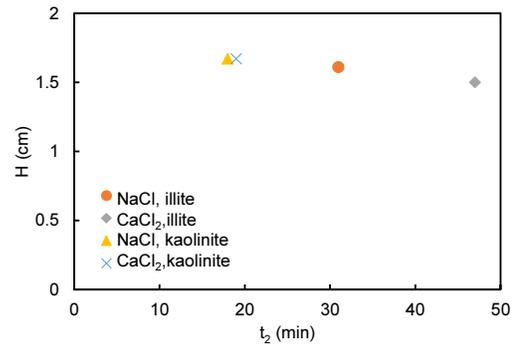


(a) Start point (t_2)

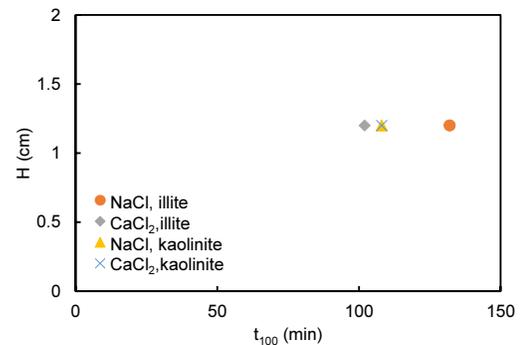


(b) End point (t_{100})

Fig. 10. Start and End Points of Self-Consolidation Test According at the Water Content of 1,000%

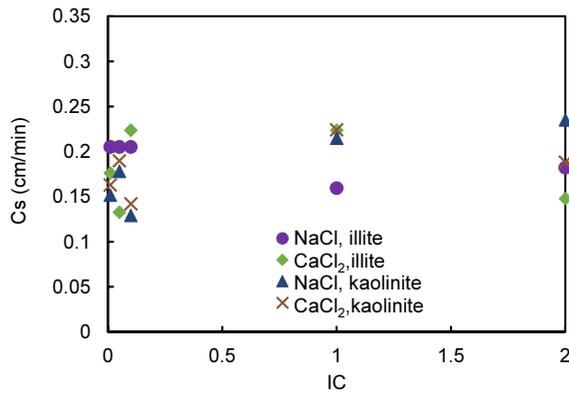


(a) Start point (t_2)

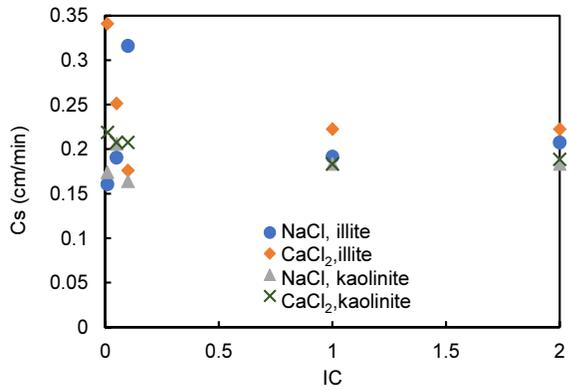


(b) End point (t_{100})

Fig. 11. Start and End Points of Self-Consolidation Start and End Point at the Water Content of 2,000%



(a) Water content 1,000%

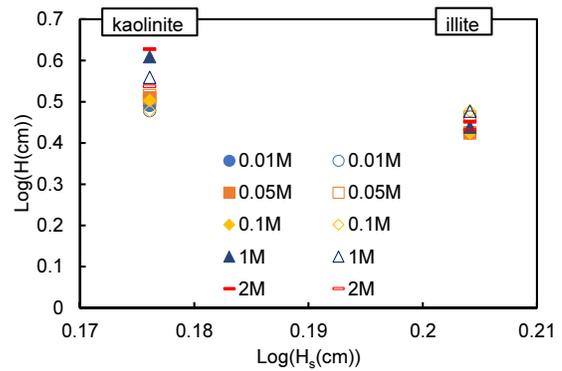


(b) Water content 2,000%

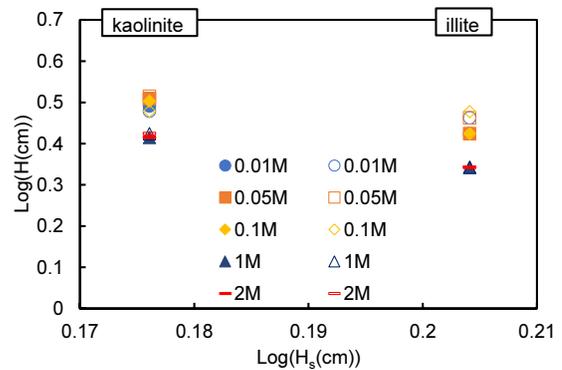
Fig. 12. Sedimentation Consolidation Coefficient According to the Water Content

나이트가 일라이트에 비해 빠른 자중압밀 시점을 보임을 알 수 있다.

Fig. 12에 Figs. 10과 11에서 산정된 자중압밀 시점 및 종점을 이용하여 산정된 침강압밀계수를 나타내었다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 이온농도에 따른 침강압밀계수는 뚜렷한 경향성이 나타나지 않았다. 하지만 5가지 이온농도에서의 평균 침강압밀계수를 도출한 결과 함수비 2,000%에서 평균 침강압밀계수(0.182 cm/min~0.243 cm/min)가 1,000% (0.181 cm/min~0.191 cm/min)보다 다소 큰 것으로 평가되었다. 이러한 경향은 함수비 증가에 따라 침강압밀계수가 증가하는 Yano (1985)의 연구결과와 유사하며 함수비가 1,000%에서 2,000%로 증가하면 침강속도와 마찬가지로 자중압밀 진행속도가 증가하는 것을 의미한다. 본 연구에서 산정된 함수비 및 이온농도에 따른 침강속도, 자중압밀 속도의 분석 결과는 팽창성이 거의 없는 점토인 일라이트와 카올리나이트의 경우에만 해당되며 몬모릴로나이트와 같은 팽창성이 큰 점토의 경우에는 이온농도가 감소할수록 점토입자 간 인력이 작아지기 때문에 부피가 팽창되고 자중압밀속도가 줄어 들 것으로 사료된다.



(a) t_2



(b) t_{100}

Fig. 13. Relationship between Interfacial Height (H) and Real Volume Height (H_s) at Water Content of 1,000% (Closed Symbol: NaCl and Open Symbol: CaCl₂)

4.3 계면고(H)와 실질토랑고(H_s)

Fig. 13은 Figs. 10과 11의 자중압밀 시점(t_2)과 종점(t_{100})에서의 계면고(H)와 실질토랑고(H_s)의 관계를 나타내었다. 계면고는 침강 및 자중압밀 동안 점토 슬러리의 높이를 나타내며, 실질토랑고는 건조한 상태에서 실제 흙의 높이를 나타낸다(Yun and Kim, 2014). 기존의 연구들(Lee and Kang, 2000; Kim, 2008; Kim, 2010; Lee and Lee, 2011), Yun and Kim (2014)은 $\log(H)$ 와 $\log(H_s)$ 가 선형적 관계(선형회귀 분석)를 보이며 흙의 종류에 따라 그 기울기나 절편이 달라지는 경향을 나타내고 함수비가 증가할수록 $\log(H)$ 와 $\log(H_s)$ 가 모두 감소하는 경향을 나타낸다. 1,000% 함수비에서 이온농도와 점토종류에 따른 $\log(H)$ 와 $\log(H_s)$ 를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에 나타난 결과는 $\log(H)$ 와 $\log(H_s)$ 의 관계가 함수비 뿐 아니라 이온농도 및 이온가수에 따라서 변화됨을 나타낸다. 따라서 실질토랑고에 따른 자중압밀 시점과 종점에서 계면고 예측 회귀분석 모델 구축 시에 함수비 뿐만 아니라 이온농도를 영향인자로 고려해야 한다. 본 연구에서 이용한 이온농도 범위인 0.01~2 M은 실제 해양의 이온농도 범위로 보기에 다소 넓은 범위이나 해양별

용해되어있는 염의 종류 및 종류별 점유율이 상이하기 때문에 정확한 계면고 예측을 위해서는 이온농도 및 이온가수(또는 이온강도)가 고려되어야 한다. 또한 본 연구에서 수행된 다소 낮은 이온농도($< 0.1 \text{ M}$) 조건에서의 결과 및 분석은 점토의 지반공학적인 거동 분석에 중요 고려요소인 압축성(compressibility), 투수계수(permeability) 등의 평가 및 예측에 중요한 기초자료가 될 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 점토슬러리의 침강 및 자중압밀 특성을 분석하기 위하여 점토(일라이트, 카올리나이트)를 이용하여 이온영향인자(이온농도, 이온가수)에 따라 함수비(1,000%, 2,000%)를 달리하여 실내침강실험을 수행하였다. 수행된 실내실험을 통하여 점토슬러리의 침강거동을 관찰하고 이온영향인자에 대한 점토의 침강 및 자중압밀 거동을 논의하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 점토슬러리의 함수비가 증가할수록 자중압밀 시점 및 종점이 빨라지는 것으로 분석되었다. 또한 카올리나이트가 일라이트에 비해 자중압밀 시점 및 종점이 빠른 것으로 평가되었다.
- (2) 카올리나이트와 일라이트 모두 이온농도가 0.01 M에서 2 M로 증가함에 따라 초기 침강속도가 증가되었다. 이는 점토입자간의 인력증가가 반드시 점토 클러스터의 크기 증가로 이어지지 않음을 의미한다.
- (3) Imai (1980)가 제안한 침강거동을 통하여 분산제($(\text{NaPO}_3)_6$)와 DI의 경우 자유침강, 이온농도 0.01 M-0.1 M의 구간에서 응집침강, 1 M과 2 M은 구간침강거동이 나타남을 확인하였다.
- (4) 함수비 1,000%와 2,000%에서 NaCl 용액 하의 카올리나이트의 초기침강속도가 CaCl_2 용액보다 빠른 경향을 나타내었다. 이는 용액의 이온가수(1가 또는 2가)가 카올리나이트의 침강거동에 영향을 준 것으로 분석되었다.
- (5) 주어진 시간에서 NaCl과 CaCl_2 용액에 대한 계면고의 차이는 1,000%와 2,000%의 함수비에서 모두 일라이트가 카올리나이트보다 더 크게 나타났다. 이는 일라이트가 카올리나이트보다 이온가수의 증가에 보다 민감하게 반응함을 의미한다.
- (6) 실내실험을 통해 분석된 계면고와 실질토랑고의 관계는 계면고 예측모델이 함수비 뿐 아니라 이온농도 및 이온가수에 영향을 받는 것을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022R1C1C1007296)이며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Imai, G. (1980). Settling behavior of clay suspension. *Soil & Foundation*, Vol. 20, No. 2, pp. 7-20.
- Imai, G. (1981). Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials. *Soil & Foundation*, Vol. 21, No. 1, pp. 7-20.
- Kim, G.S., Kim, D.K., and Lee, W.J. (2001). Characteristics of undrained shear strength of yangsan clay. *Journal of the Korea Institute of Construction Technology, National Library of Korea Linked Materials*, Vol. 17, No. 4, pp. 259-267.
- Kim, J.G., and Won, J.M. (2021). Assessing slope stability of clay-dominated sediments based on ionic concentrations using liquid limits. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 21, No. 5, pp. 237-243.
- Kim, K.H. (2010). *A study on the characteristics of sedimentation and self-weight consolidation for dredged soil*. Master's thesis, Korea University, pp. 5-76.
- Kim, S.S. (1987). An experimental study on the settling behavior of marine fluid mud in the west seaside of Korea (Banweol area). *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 3, No. 3, pp. 49-61.
- Kim, Y.H. (2008). *A study on the characteristics of sedimentation and self-weight consolidation for dredged soil in Gwang Yang*. Master's thesis, Korea University, pp. 3-142.
- Lee, B.J., Park, M.C., Jeon, J.S., and Park, M.C. (2009). Acceleration effect of self-weight consolidation of dredged and reclaimed ground with PBD. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 12, pp. 37-45.
- Lee, M.H., Kim, D.H., and Kim, S.S. (2008). Settling and consolidation behaviour of cohesive soil slurry. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 3C, pp. 143-148.
- Lee, S., and Kang, M.C. (2000). Estimation of volume ratio according to step up filling method for a dredged clay. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 16, No. 1, pp. 167-178.
- Lee, S., Yang, T.S., and Hwang, K.H. (1994). A study on self-weight consolidation characteristics in dredged and reclaimed clay. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 14, No. 4, pp. 953-963.

- Lee, S.H., and Lee, J.H. (2011). An experimental research about settling and consolidation characteristic of dredged soil in west coast. *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, Vol. 12, No. 5, pp. 29-36.
- Mehta, A.J., and Hwang, K.N. (1989). *Fine sediment erodibility in lake okeechobee, florida*. Tech. Report, UFL/COEL-89/019, Coastal and Oceanographic Engineering Dept., Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- Ministry of Oceans and Fisheries. (2004). *Statistical yearbook of oceans & fisheries 2004*.
- Palomino, A.M., and Santamarina, J.C. (2005). Fabric map for kaolinite: effects of pH and ionic concentration on behavior. *Clays and Clay minerals*, Vol. 53, No. 3, pp. 211-223.
- Van Olphen, H. (1977). *An introduction to clay colloid chemistry* (2nd ed.). Malabar, Florida, USA: Krieger Publishing Company, p. 318.
- Yano, K. (1985). Properties of very soft ground reclaimed by dredged marine clay and their prediction. *Japan Society of Civil Engineering*, Vol. 364, pp. 1-14 (In Japanese).
- Yun, D.H., and Kim, Y.T. (2014). Characteristics of sedimentation and consolidation for Song-Do dredged soil. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 5, pp. 371-379.

<i>Received</i>		May 23, 2022
-----------------	--	--------------

<i>Revised</i>		May 24, 2022
----------------	--	--------------

<i>Accepted</i>		June 10, 2022
-----------------	--	---------------