



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

이온농도에 따른 점토의 소성변화 및  
점토사면 안정성 평가

Impacts of ionic concentration on the plasticity of  
clay and its implications on the slope stability of  
clay deposits

蔚山大學校 大學院

建設環境工學科

金 堉 起

이온농도에 따른 점토의 소성변화 및 점토사  
면 안정성 평가

指導教授 원 중 목

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2022 年 2 月

蔚山大學校 大學院

建設環境工學科

金 堉 起

金 埈 起의 工學碩士 學位論文을 認准함

蔚 山 大 學 校 大 學 院

2022 年 2 月

金 埶 起의 工學碩士 學位論文을 認准함

審査委員 신 호 성 (印)

審査委員 원 중 목 (印)

審査委員 김 중 호 (印)

蔚 山 大 學 校 大 學 院

2022 年 2 月

## 국 문 요 약

# 이온농도에 따른 점토의 소성변화 및 점토사면 안정성 평가

蔚山大學校 大學院

建設環境工學科

金 堉 起

점토입자는 일반적으로 높은 비표면적과 음의 표면전하를 띄고 있으며, 간극수와 결합하여 이중층(double layer)을 형성한다. 이중층수의 형성은 기본적으로 전기적 인력에 의해 형성되므로 점토입자 이중층수의 두께는 간극수의 이온농도 변화에 영향을 받는다. 이중층수 두께의 변화는 점토입자의 배열이나 점토입자 사이의 간격을 변화시키기 때문에 점토지반의 체적, 강도(strength), 강성(stiffness), 소성성(plasticity) 등 여러 지반 물성치에 영향을 끼치게 된다. 본 연구에서는 대표적인 점토광물인 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트의 이온농도에 따른 소성성의 변화를 고찰하기 위하여 액성한계 시험을 초순수부터 2M 까지 진행하고 이에 따른 점토 종류별 액성한계의 경향 파악을 통하여 점토의 소성성에 대하여 논의하였다. 또한 원자가(ionic valence)가 액성한계에 끼치는 영향을 고찰하기 위하여 NaCl과 CaCl<sub>2</sub>을 이용하여 이온농도를 조절하였다. 또한 이온농도가 점토지반의 사면안정에 끼치는 영향을 고찰하기 위한 수치해석 모델은 COMSOL Multiphysics을 이용하였으며, 사면안정 해석 모델에 경험식을 이용한 내부마찰각 추정식을 적용하여 이온농도에 따른 사면의 안정성 평가를 진행하였다. 사면안정해석은 강도감소기법(Shear Strength Reduction Method)을 사용하였다.

액성한계 시험 결과 이온농도가 증가할수록 시료의 액성한계는 감소하는 경향을 보였으며, 카올리나이트와 벤토나이트의 경우 원자수에 따른 감소 정도 차이가 다르게 나타났다. 수치해석 결과 이온농도가 증가할수록 점토사면의 Strength Reduction Factor(SRF)는 증가하였다. 본 연구에서 산정된 실험결과 및 수치해석 결과를 통하여 이온농도의 변화가 점토의 액소성한계 및 점토를 포함한 사면의 안

정성에 끼치는 영향을 보였으며, 점토가 많이 포함된 사면에 대한 안전을 평가에 이온농도의 변화에 따른 강도정수가 고려되어야 함을 보여준다.

# 목 차

국 문 요 약 .....	i
목 차 .....	ii
표 목 차 .....	vi
그 립 목 차 .....	vii
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 및 목적 .....	2
1.2 연구 방법 .....	3
제 2 장 점토광물의 특성과 사면안정의 이론적 고찰 .....	5
2.1 점토광물 .....	7
2.1.1 점토광물의 구성 .....	5
2.1.1.1 이층구조의 점토광물 .....	6
2.1.1.2 삼층구조의 점토광물 .....	6
2.1.2 점토광물과 물의 상호작용 .....	8
2.1.3 점토광물의 특성 .....	9
2.2 사면안정 해석 .....	10
2.2.1 절편법(Bishop 법) .....	11
2.2.2 유한요소법 .....	13
제 3 장 점토시료의 액성한계 및 소성한계 시험 .....	14
3.1 실험 방법 .....	14

3.1.1 실험 점토 .....	14
3.1.2 Fall cone test .....	15
3.1.3 측정 방법 .....	16
3.1.4 실험 조건 .....	16
3.2 액성한계 시험 결과 .....	17
3.2.1 이온농도에 따른 점토의 액성한계 변화 .....	17
3.2.2 액성한계 값을 이용한 잔류내부마찰각 추정 .....	21
3.2.3 입자 크기에 따른 점토의 액성한계 변화 .....	22
3.3 소성한계 시험 결과 .....	26
3.3.1 이온농도에 따른 점토의 소성한계 변화 .....	26
3.3.2 소성지수 값을 사용한 잔류내부마찰각 추정 .....	26
<b>제 4 장 점토사면의 사면안정 수치해석 .....</b>	<b>28</b>
4.1 시험결과를 이용한 사면안정 수치해석 .....	28
4.1.1 Comsol 사면안정 수치해석 모델 .....	29
4.2 사면안정 예제 및 검증 .....	32
4.2.1 Bishop의 간편법을 이용한 검증 .....	32
4.2.1 사면의 크기에 따른 검증 .....	33
4.3 사면안정 수치해석 결과 .....	35
4.3.1 배면 수위 높이에 따른 사면안정 해석 결과 .....	35
4.3.2 경사 각도에 따른 사면안정 해석 결과 .....	38
<b>제 5 장 결 론 .....</b>	<b>42</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>43</b>

영 권 요 약 .....46

## 표 목 차

표 3.1 점토광물의 비표면적 및 양이온치환용량(Baker, M.L. 2017) .....	19
표 3.2 이온농도에 따른 액성한계 시험 결과 .....	20
표 3.3 액성한계 값을 이용한 내부마찰각 산정(Illite, Kaolinite) .....	22
표 3.4 NaCl 용액을 이용한 소성한계 시험 결과 .....	26
표 3.5 벤토나이트의 잔류내부마찰각 산정 결과 .....	27
표 4.1 Material properties (Rayhani (2008)) .....	31
표 4.2 사면경사에 따른 이론값과 수치해석 결과 .....	33
표 4.3 사면의 크기와 경사에 따른 이론값과 수치해석 결과 .....	35

## 그림 목 차

그림 1.1 점토입자의 표면 .....	3
그림 1.2 연구 진행 개략도 .....	4
그림 2.1 점토입자 분자 구조 .....	5
그림 2.2 Kaolinite의 원자 구조(Grim, 1962) .....	6
그림 2.3 Montmorillonite의 원자 구조 .....	7
그림 2.4 점토광물의 이중층 .....	8
그림 2.5 점토 입자 표면에서의 거리에 따른 이온농도 .....	9
그림 2.6 Atterberg limits .....	9
그림 2.7 Bishop의 간편법(Bishop, 1955) .....	11
그림 3.1 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트 비중계 시험 결과 .....	15
그림 3.2 Fall cone test 장비 .....	15
그림 3.3 일라이트 액성한계 시험 결과 예시 .....	16
그림 3.4 액성한계 시험 결과 .....	19
그림 3.5 벤토나이트 액성한계 시험 결과 .....	21
그림 3.6 NaCl용액을 이용한 입경 별 액성한계 시험 결과 .....	24
그림 3.7 CaCl <sub>2</sub> 용액을 이용한 입경 별 액성한계 시험 결과 .....	25
그림 4.1 배면수위에 따른 사면안정 수치해석 .....	30
그림 4.2 경사 각도에 따른 사면안정 수치해석 .....	31
그림 4.3 2:1 경사에서 사면의 total displacement .....	32
그림 4.4 2:1 경사에서 이론값과 사면안정 수치해석 결과 안전율 비교 .....	33
그림 4.5 검증을 위한 사면의 모델 구성 .....	34
그림 4.6 3:1 경사에서 사면의 total displacement .....	34
그림 4.7 배면수위에 따른 사면안정 수치해석 결과 .....	37
그림 4.8 이온농도와 경사 각도에 따른 사면의 안전율 .....	41

# 제 1 장 서 론

사면의 붕괴는 파괴면에서 흙의 전단강도 감소나 유발 전단강도의 증가에 따라 발생하며 전단강도의 감소는 순간적으로 강한 강우나 지진 등의 자연현상에 의해 발생한다. 특히 점토를 포함한 흙의 경우 순간적으로 강한 강우나 지속적인 내부침식은 전단강도 감소의 원인이 된다. 이러한 댐의 붕괴 및 사면 파괴를 방지하기 위하여 일반적으로 주어진 조건에서의 댐의 붕괴 가능성을 수치해석을 통해 산정된 안전율을 통하여 평가한다. 신뢰성이 높은 수치해석을 수행하기 위해서는 정확한 흙의 물성치가 수치해석에 입력값으로 이용되어야 한다. 점토입자의 표면은 음전하를 띠고 있어 간극수와 반응하여 이중층수를 형성하며 따라서 점토의 물리적, 화학적 거동은 간극수의 화학적 성질에 큰 영향을 받는다. 일반적으로 간극수의 높은 이온농도는 점토입자의 이중층수 두께 감소를 유발하며 이는 점토지반의 투수계수와 전단강도를 증가시킨다. 이는 점토가 많이 포함된 사면의 안정성 해석에는 이온농도의 영향이 수반되어야 함을 뜻한다. 이온농도의 변화는 점토가 포함된 사면의 안전율을 변화시킬 수 있기 때문에 신뢰성이 높은 수치해석 결과를 위하여 이온농도에 따른 지반의 물성치가 수치해석에 적용되어야 한다. 하지만 일반적으로 사면의 파괴를 유발시키는 주요 원인은 강우나 내부침식인 경우가 대부분이기 때문에 이온농도에 따른 사면 안전율 평가에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다. 이온농도의 변화가 크지 않을 경우 사면의 안전율이 이온농도에 크게 영향을 받지 않으나 해수지역의 담수가 침투할 경우 이온농도의 감소가 전단강도의 감소를 유발하며 사면의 안전율의 감소를 가져올 가능성이 존재한다(Tiwari and Ajmera, 2015).

본 연구에서는 Fall cone test를 수행하여 이온농도가 대표적인 점토광물인 카올리나이트, 일라이트, 벤토나이트의 액성한계에 끼치는 영향에 대하여 평가하였다. 또한 평가한 액성한계를 이용하여 추정된 강도정수(점착력, 내부마찰각)을 유한요소 수치해석에 적용하여 이온농도에 따른 사면의 안정성을 평가하였다. 사면의 안정성 평가에는 강도감소기법(Matsui and San, 1992; Griffith, 1999)을 적용하여 주어진 사면이 파괴될 때까지 전단강도를 감소시키면서 수치해석을 수행하였고 파괴가 일어나는 순간의 강도감도계수를 안전율로 산정하였다.

## 1.1 연구 배경 및 목적

점토 입자의 표면은 상쇄되지 않는 전하(uncompensated charge)와 동형치환(isomorphous substitution)에 의하여 일반적으로 음전하를 띄고 있다. 따라서 간극수에 존재하는 양이온(e.g,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ )이 점토 표면에 부착되어 간극수와 평형상태를 이루게 된다. 간극수의 이온농도(Ionic Concentration, IC)가 큰 경우 부착된 양이온에 의해 점토입자의 이중층 두께는 부착된 양이온에 의해(Eq. (1)) 감소하게 되고 입자간의 인력이 증가하게 된다. 반대로 IC가 감소할수록 점토표면의 음이온을 상쇄하기 위하여(평형에 이르기 위하여) 많은 물 분자가 점토입자 주변에 그림 1.1 과 같이 존재하게 되므로 이중층 두께가 증가하게 된다. 증가된 이중층 두께는 점토 입자간의 반발력(repulsion)을 증가시키고 따라서 점토의 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. 점토입자 이중층 두께( $k^{-1}$ )를 결정하는 공식은 아래 Eq. 1.1과 같다.

$$k^{-1} = \sqrt{\frac{\epsilon KT}{8\pi n_0 e^2 V^2}} \quad \text{Eq. 1.1}$$

여기서  $k^{-1}$  = Double layer thickness

$\epsilon$  = Relative permittivity

$K$  = Boltzmann constant

$T$  = Temperature

$n_0$  = Ionic concentration

$e$  = electron charge

$V$  = Valance of cation

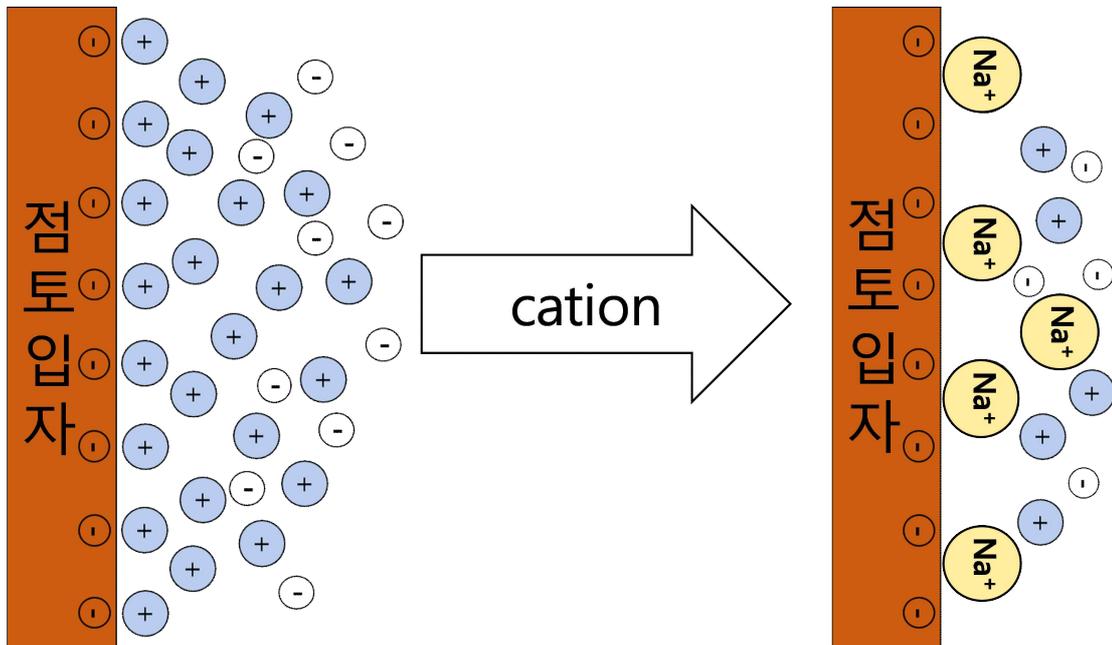


그림 1.1 점토입자의 표면

## 1.2 연구 방법

본 연구는 아래 그림 1.2와 같이 진행되었다. 입경에 따른 점토의 액성한계 변화를 측정하기 위하여 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트를 각각 sieve No. 200 (opening size (D)=75 $\mu$ m), 325 (D=45 $\mu$ m), 500 (D=30 $\mu$ m)으로 입경별 샘플을 취득한 후 취득한 시료를 0~2M사이의 6가지 이온농도 별 간극수와 혼합하여 혼합된 시료에 대한 fall cone test를 수행하였다(3장). Fall cone test 수행결과로 도출된 액성한계 값을 이용하여 액성한계에 따른 잔류내부마찰각 추정공식에 대입하여 잔류내부마찰각을 산정하였다. 산정된 내부마찰각은 COMSOL의 사면안정 수치해석 모델에 적용하여 산정된 안전율과 이온농도의 상관관계를 분석하였다(4장).

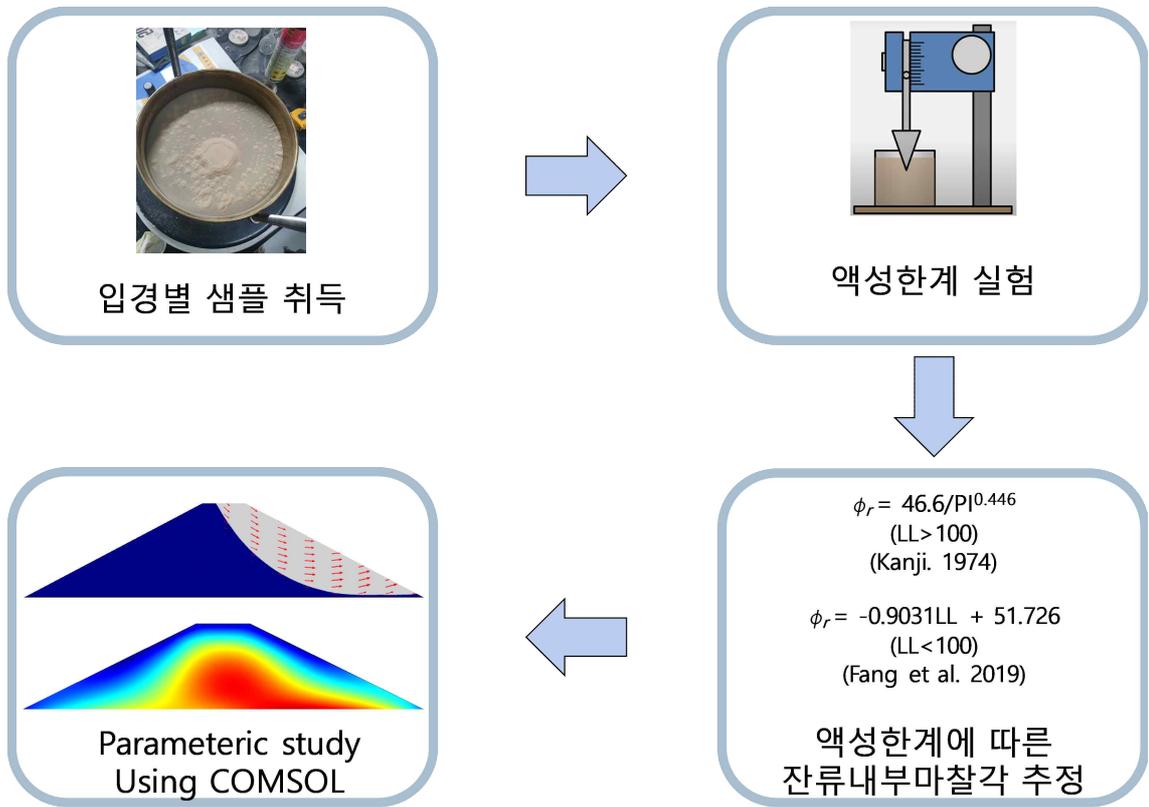


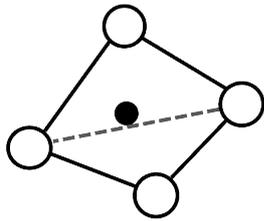
그림 1.2 연구 진행 개략도

## 제 2 장 점토광물의 특성과 사면안정의 이론적 고찰

### 2.1 점토 광물

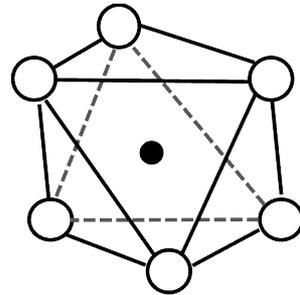
#### 2.1.1 점토광물의 구성

점토광물을 구성하고 있는 기본 단위는 Tetrahedron(사면체)과 Octahedron(팔면체)으로 나눌 수 있다. Tetrahedron은 그림 2.1(a)와 같이 규소(Si)를 중심으로 네 개의 산소(O)가 Tetrahedron 구조를 이루고, Octahedron은 그림 2.1(b)와 같이 알루미늄(Al) 혹은 마그네슘(Mg)을 중심으로 여섯 개의 수산기(OH)로 둘러싸여 Octahedron 구조를 이루고 있다.



○ : 산소(O)    ● : 규소(Si)

(a) Tetrahedron의 기본 구조



○ : OH    ● : Al 또는 Mg

(b) Octahedron의 기본 구조

그림 2.1 점토입자 분자 구조

이러한 기본 구조 단위는 독립적으로 존재할 수 없고, 산소 혹은 수산기끼리 서로 전기적으로 횡방향 결합을 하여 존재한다. Tetrahedron이 횡방향으로 결합되어 있는 것은 Slica 시트(sheet)라고 하며, Octahedron이 횡방향으로 결합된 것은 Gibbsite라고 한다.

### 2.1.1.1 이층구조의 점토광물

대표적인 점토광물중 하나인 Kaolinite는 하면엔 Gibbsite, 상면은 Silica로 이루어진 두 개의 시트가 기본이 되어 이루어져 있다. 그림 2.2와 같은 한 쌍의 기본 구조 단위로 이루어진 것을 이층구조를 가진 점토광물이라 하며 이러한 이층구조 단위가 수소 결합 또는 2차 원자가결합으로 여러 겹이 결합하여 이루어진 것이다. Kaolinite는 이러한 구조 단위가 115개 결합되어 있다.

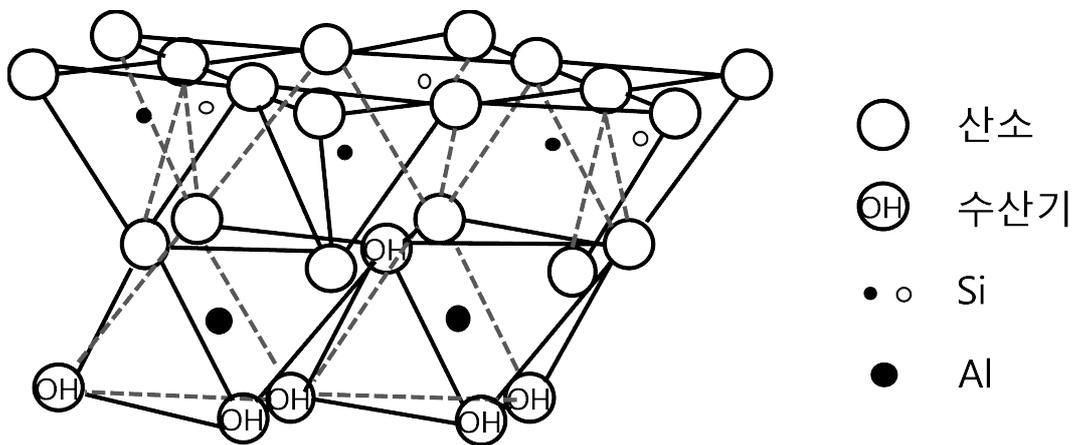


그림 2.2 Kaolinite의 원자 구조(Grim, 1962)

점토광물이 형성되는 과정에서 동형치환 현상이 일어난다. 동형치환이란 어떤 한 원자가 비슷한 이온 반경을 가진 다른 원자와 치환하는 것을 의미하며, Kaolinite 형성과정에서 Al 원자가 충분히 존재하였다면  $Si^{+4}$ 가 자리잡고 있어야 할 자리에  $Al^{3+}$ 이 대신 들어갈 수 있다. 그렇게 되면 4개의 Si 자리에 3개의 Al이 들어갔으므로 이 점토광물은 +1가가 부족하게 되어 음전하의 성질을 나타나게 된다. 대부분의 점토광물 표면이 음으로 대전 되는 것은 이러한 이유 때문이고 이것은 점토의 거동이 실트나 모래와 같은 다른 흙과 차별화되는 가장 큰 이유가 된다 (Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S. (2008)).

### 2.1.1.2 삼층구조의 점토광물

Montmorillonite는 그림 2.3과 같이 두 장의 Silica 시트 사이에 Gibbsite가 끼

어 있는 삼층 구조를 이루고 있다. Montmorillonite는 Gibbsite의 Al 이온 6개당 1개의 Mg이 동형치환을 하며 이로 인해 음의 전하를 가지게 되고  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  와 같은 양이온을 끌어들여 평형을 이룬다. 이러한 양이온들은 일반적으로 쉽게 교환될 수 있으며 이 구조 단위 사이에 물이 들어가면 쉽게 팽창하는 성질이 있다.

벤토나이트는 타 점토광물에 비해 높은 팽창성, 큰 비 표면적, 높은 CEC(Cation Exchange Capacity) 및 높은 점성과 가소성을 보이는 점토광물이며, Montmorillonite의 층간 양이온 중에 따라 Ca-Bentonite, Na-Bentonite로 구분된다(고상모 외 2002).

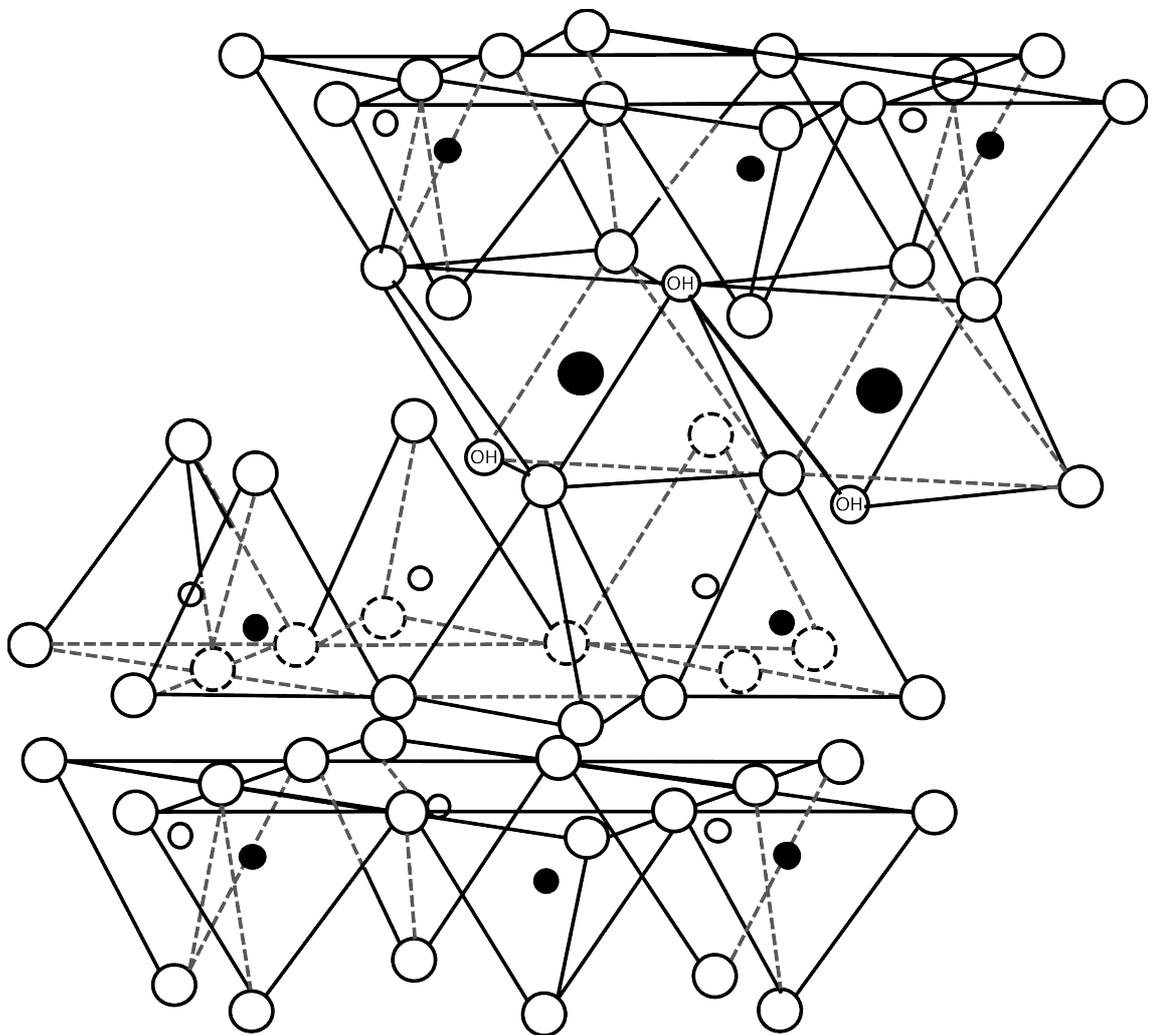


그림 2.3 Montmorillonite의 원자 구조  
(Grim, 1962)

Illite도 Montmorillonite와 마찬가지로 Gibbsite가 끼어 있는 삼층 구조를 이루고 있다. Illite는 Slica의  $Si^{+4}$ 가  $Al^{+3}$ 으로 동형치환 되어있으며, 이로 인해 음의 전하는 삼층구조 단위 사이에 있는  $K^+$ 으로 평형을 이룬다. Illite는 시트 사이에 간극수가 존재해도 Montmorillonite와 다르게 팽창하지 않는다.

### 2.1.2 점토광물과 물의 상호작용

점토광물은 주로 동형치환과 상쇄되지 않는 전하에 의하여 일반적으로 음전하를 띠고 있다. 따라서 간극수에 존재하는 양이온( $Na^+$ ,  $Ca^{+2}$ )이 점토 표면에 부착되어 간극수와 평형상태를 유지한다. 그림 2.4와 같이, 교환할 수 있는 이온이 입자에 끌려서 평형을 유지하고 있는 두께를 이중층(double layer)이라고 한다(Sridharan, A., & Jayadeva, M. S. (1982)).

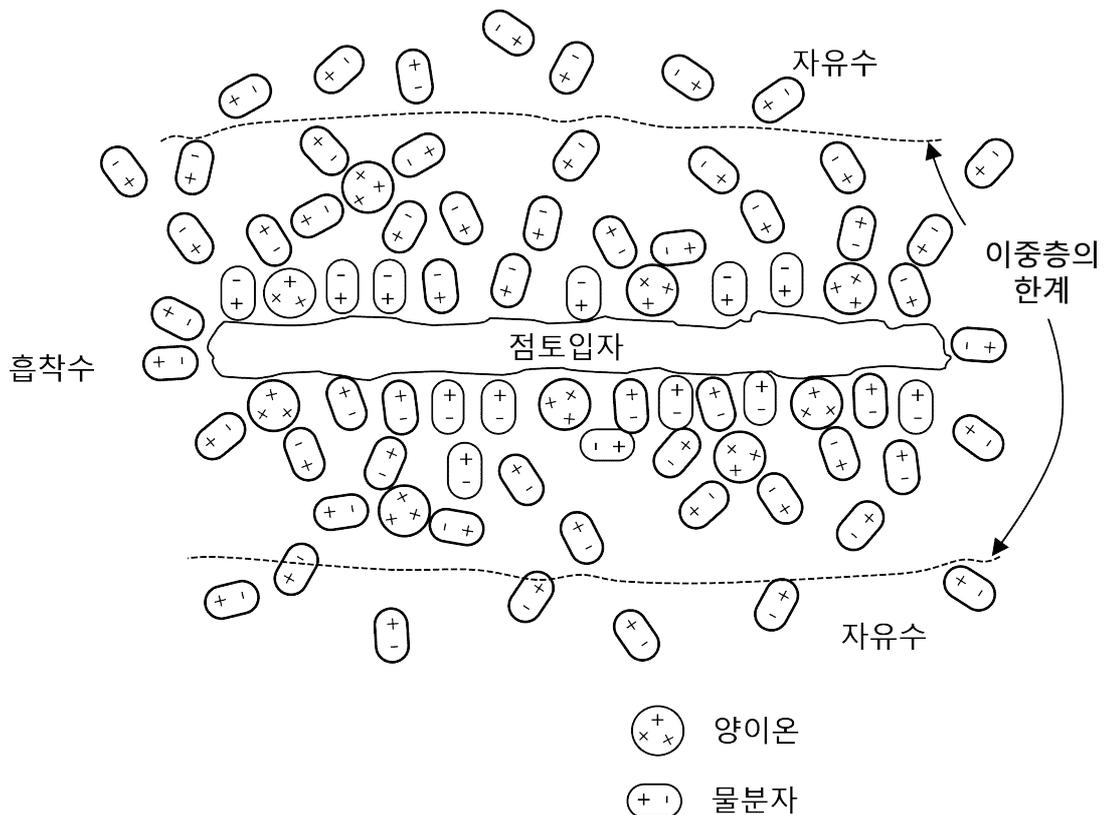


그림 2.4 점토광물의 이중층

그림 2.5는 점토입자로부터 거리에 따른 일반적인 양이온과 음이온의 농도를 나타내며 입자 표면에서의 거리가 멀어질수록 양이온과 음이온의 농도가 감소하여 평형에 이르는 것을 볼 수 있다. 또한 일정 거리까지만 점토입자 표면의 음전하에 따른 영향이 미치는 것을 볼 수 있고 상대적으로 먼 거리에서는 점토입자에 의한 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있다.

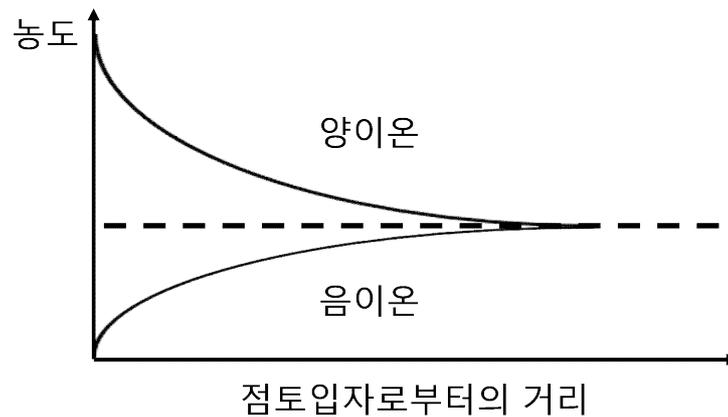


그림 2.5 점토 입자 표면에서의 거리에 따른 이온농도

### 2.1.3 점토광물의 특성

점토광물이 존재하는 점성토는 점토광물 주변에서의 흡착수로 인하여 점성토의 모습과 성질이 함수비가 증가함에 따라 완전히 바뀌게 된다. 아주 건조한 상태에서의 흙은 고체로 분류할 수 있지만 함수비가 일정수준 이상으로 커지게 된다면 상태를 유지하고 있는 것이 아니라 액체처럼 흐르는 상태에 이르게 된다. 흙의 함수비가 증가함에 따라 그림 2.6과 같이 흙이 네 가지 상태로 변하게 된다. 이를 연경도(consistency)라 하며, 액성한계(Liquid limit), 소성한계(Plastic limit)를 결정하는 방법은 Casagrande (1932, 1948) 표준 시험에 의해 결정된다.

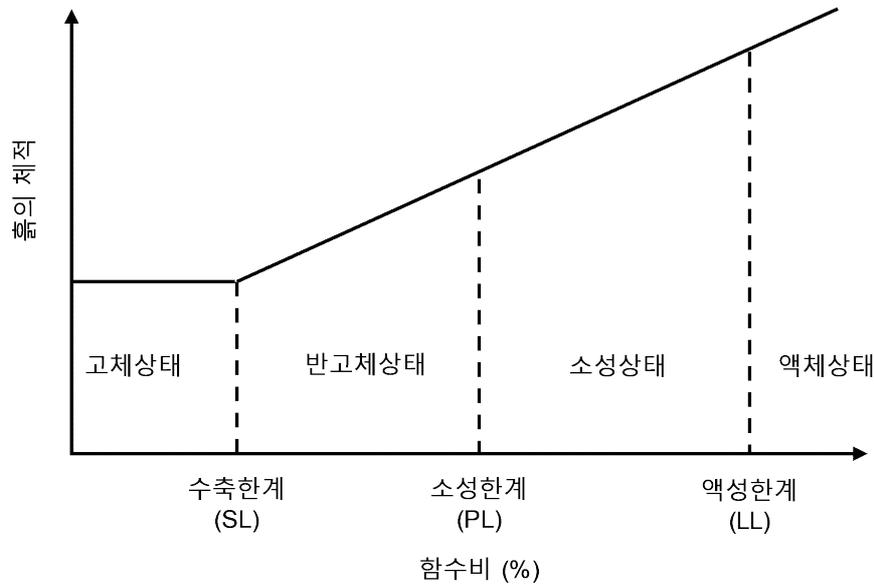


그림 2.6 Atterberg limits

점성토의 배열은 흙 입자의 크기나 모양보다는 점토광물 특성과 점토 주위의 이중층수의 특성에 따라서 좌우된다. 이온농도가 증가함에 따라 이중층수는 두께가 감소하기 때문에 이온농도의 영향을 받는 점토는 면모구조를 띄게 되며, 이는 반발력 감소로 입자의 면과 모서리 접촉뿐만 아니라, 면과 면의 인력도 강하게 작용하기 때문이다.

## 2.2 사면안정 해석

사면안정 해석은 지반공학에서 가장 많이 다루어지는 문제 중 하나이다. 사면은 중력에 의한 자중을 항상 받는 상태이며 간극수압 및 지진, 재하중 등의 외력으로 인해 사면의 안정은 큰 영향을 받는다. 이때 자중 및 외력에 의해 사면의 전단응력이 사면이 갖고 있는 전단강도보다 크게 되면 사면의 붕괴가 발생한다. 이와 같은 전단응력과 전단강도에 따른 사면 파괴에 대한 안정성을 안전율 산정에 의하여 검토하는 것을 사면안정 해석이라 한다.

이러한 사면안정 문제를 해석하는 경우, 변형과 안정성을 분리해 각각의 해석 방법에 따라 적용 및 분석되어왔다. 그러나 실제 지반의 붕괴 현상은 서서히 변형이 증대되어 국부적인 영역에 대변형이 발생 된다. 따라서 사면의 안정해석법에 있어

서 초기 변형부터 붕괴가 발생할때까지 연속적으로 계산할 수 있는 해석법의 확립이 중요하다.

현장에서 사면에 대한 안전관리를 위해서는 한계평형이론에 의한 일체법과 절편법, 탄소성이론에 의한 유한요소법과 같은 사면의 안전율에 대한 계산뿐만 아니라, 사면의 붕괴 거동에 대한 분석이 필요하다. 또한, 사면의 지속적 파괴에 대한 적절한 계측 위치 및 계측 관리 값을 사전에 파악하여 관리할 수 있도록 해야 한다. 유한요소법은 이러한 계측 관리 방법에 대하여 적절한 해석 결과를 줄 수 있으며, 사면의 진행성 파괴 거동을 분석할 방법이다(Duncan, J. M. (1996)).

### 2.2.1 절편법(Bishop 법)

절편법은 그림 2.7과 같이 활동면 위의 흙을 여러 개의 수직으로 평행한 절편들로 나누어 해석하는 방법으로 사면 안전율을 활동면 중심에서의 모멘트 평형으로 구하고 각 분할 절편간의 작용력의 합력은 평행이라는 가정으로 계산한다.

절편법의 대표적인 예시로 Bishop법이 있다. Bishop법은 여러 절편법과는 이론적으로 유사하나 간극수압을 고려할 수 있어 Fellenius의 방법보다 큰 정밀도와 비원호 활동면에 대해서도 작용이 가능한 장점이 있다.

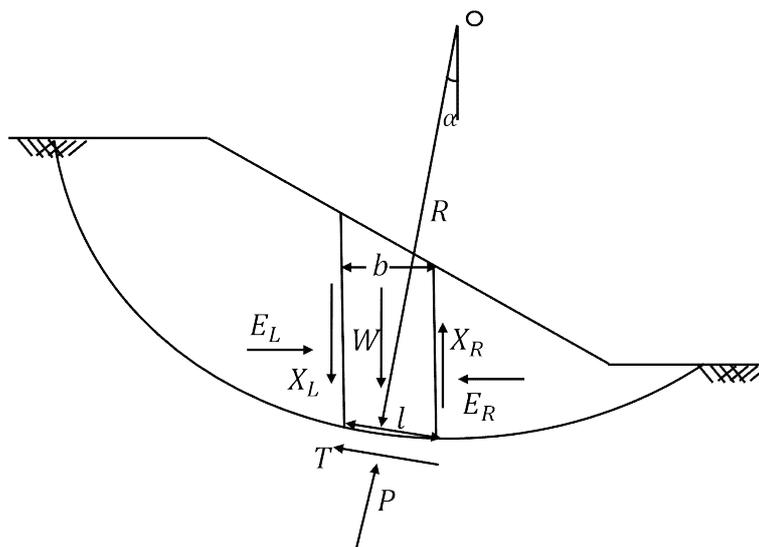


그림 2.7 Bishop의 간편법(Bishop, 1955)

사면의 안전율은 아래의 공식을 이용하여 계산된다.

Mohr-Coulomb failure criterion

$$s = c' + (\sigma - u)\tan\phi' \quad \text{Eq. 2.1}$$

여기서  $c'$  = 점착력

$s$  = 전단강도

$u$  = 간극수압

$\phi'$  = 내부마찰각

여기서  $\tau$ 는 전단응력을 나타내며 이때 수정전단강도  $\tau = s/F$  ( $F$ = 안전율),  $P = \sigma l$ ,  $T = \tau l$ 을 대입하면 Eq. (2-2)와 같이 정리할 수 있다.

$$T = \frac{(cl + P - ul)\tan\phi}{F} \quad \text{Eq. 2.2}$$

수평 방향에서의 평형조건은 아래의 Eq. 2.3과 같이 정리할 수 있다.

$$P\cos\alpha + T\sin\alpha = W - (X_R - X_L) \quad \text{Eq. 2.3}$$

여기서,  $\alpha$ 는 절편의 저변이 수평면과 이루는 각도이다.

Bishop의 간편법은 절편 양측의 전단력의 합은 0으로 가정하여,  $X_R - X_L = 0$ 으로  $P$ 는 아래의 Eq. 2.4와 같이 구할 수 있다.

$$P = \frac{(W - \frac{c'l\sin\alpha - ul\tan\phi'\sin\alpha}{F})}{M_\alpha}, \quad M_\alpha = \cos\alpha(1 + \tan\alpha\frac{\tan\phi}{F}) \quad \text{Eq. 2.4}$$

모멘트 평형조건  $\sum WR\sin\alpha = \sum TR$ 을 고려하려  $T$ 에 대하여 정리하면 다음과 같이 안전율  $F$ 를 나타낼 수 있다.

$$F_m = \frac{\sum(c'l + (P-ul)\tan\phi')R}{\sum W\sin\alpha} \quad \text{Eq. 2.5}$$

### 2.2.2 유한요소법

유한요소법은 모델링된 각 요소에서의 힘 평형조건과 적합조건, 구성방정식 및 경계 조건을 모두 만족시키는 수치해석 방법으로 지반의 거동을 모사할 수 있으면 실제 사면의 붕괴와 가까운 형상을 구현할 수 있는 방법이다. 특히 사면의 파괴활동에 대한 사전의 가정 없이 자동적으로 파괴되는 과정을 모사할 수 있는 방법이다.(Griffiths and Lane (1999))

본 연구는 유한요소법으로 사면안정 수치해석을 진행하는 방법으로 전단강도감소기법(Shear Strength Reduction Method)을 사용하였으며, 사면이 파괴되었을때의 강도감소계수(Strength Reduction Factor(SRF))를 안전율로 산정하였다.

본 연구에서는 수리-역학 연계해석을 수행하였다. 지반의 수리학적 거동이 역학적 거동에 영향을 끼치기 때문에 주어진 흐름 조건에서의 간극수압을 먼저 계산하고 계산된 간극수압을 역학해석에 입력 값으로 이용하는 one-way 연계해석 방법을 이용하였다. 파괴가 일어나기전 역학적 해석결과(응력, 변형률)는 간극률에 거의 영향을 끼치지 않고 따라서 일반적으로 간극수의 흐름에 큰 영향을 끼치지 않기 때문에 해석의 간편성과 효율성을 위하여 완전연계해석이 아닌 one-way 연계해석 방법을 이용하였다.

## 제 3 장 점토시료의 액성한계 및 소성한계 시험

### 3.1 실험 방법

#### 3.1.1 실험 점토

액성한계 시험에 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트 3가지 시료가 사용되었으며, 일라이트 시료는 (주)메텍스, 경기도 성남에서 구입했으며 원산지는 국내이다. 카올리나이트는 (주)낙우산업, 경남 산청군, 벤토나이트는 (주)일성케미칼, 경상북도 경주시에서 구입했으며 두가지 시료 모두 국내에서 생산되었다. 3가지 시료는 점토입자 크기에 따른 영향을 고려하기 위하여 체가름을 진행하지 않은 상태에서 실험을 실행하였으며, 추가적으로 200, 325번체를 통과한 샘플에 대한 액성한계 실험을 수행하였다.

본 연구에서 점토의 액성한계 측정을 위하여 다음과 같이 fall cone test(BS 1377, BSI(1990))를 진행하기에 앞서 점토의 물성치 산정을 위하여 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트의 입도분포곡선은 비중계 실험(ASTM D422)를 통하여 산정하였다. 분산제를 첨가한 비중계 시험을 통한 세 가지 점토시료의 입도분포는 그림 3.1과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 본 연구에서 이용된 점토 시료는 대체적으로 큰 입경을 가지는 것으로 나타났다. 벤토나이트의 경우 상대적으로 작은 입자들은 침하 속도가 매우 늦기 때문에 실험을 일주일 후에 종료하였다. 또한 3가지 시료의 비중은 비중병 시험(ASTM D854)에 의하여 측정하고 그림 3.1 에 나타내었다.

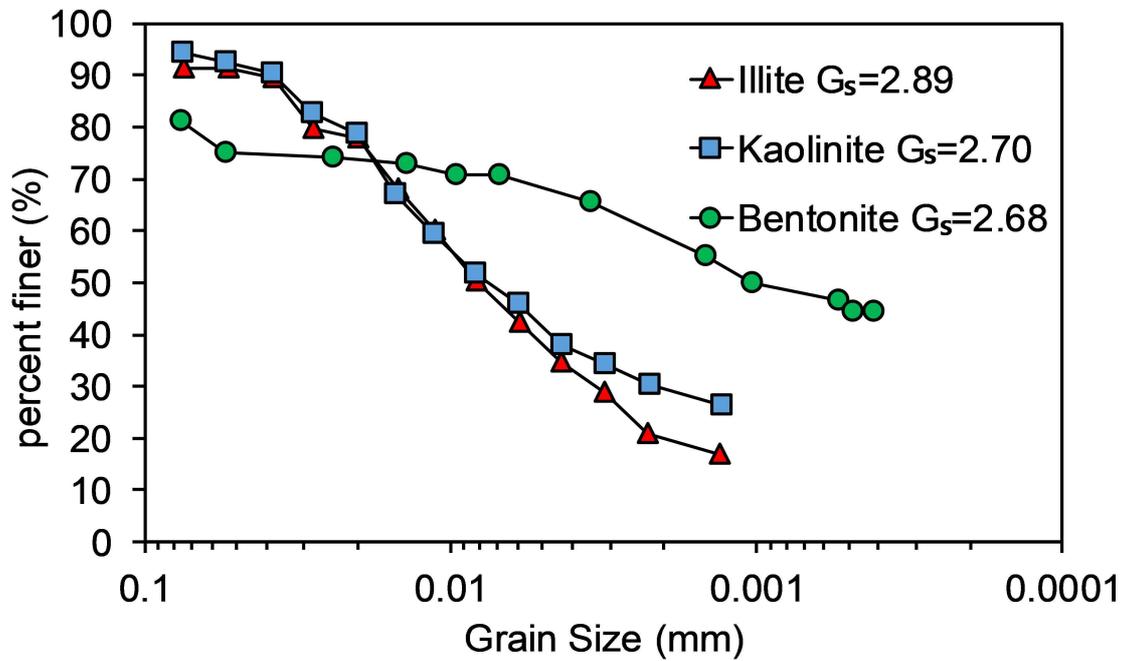


그림 3.1 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트 비중계 시험 결과

### 3.1.2 Fall cone test

Fall cone test의 낙하 추는 선단각도가  $30^\circ$ , 무게는 80g인 추를 사용하였으며, 낙하 시간은 5초로 설정하여 시험을 진행하였다. 본 연구에 이용한 Fall cone test 장비 사진을 그림 3.2에 나타내었다.



그림 3.2 Fall cone test 장비

### 3.1.3 측정 방법

액성한계는 BS1377에 따라 그림 3.3과 같이 추의 관입량 20mm에서의 함수비를 액성한계로 산정하였고 이를 위하여 총 4번의 함수비에서 관입량을 측정하였다. 관입량 20mm에서의 함수비는 그림 3.3과 같이 4번의 실험데이터를 통한 데이터를 1차함수로 회귀분석한 식을 이용하여 추정하였다.

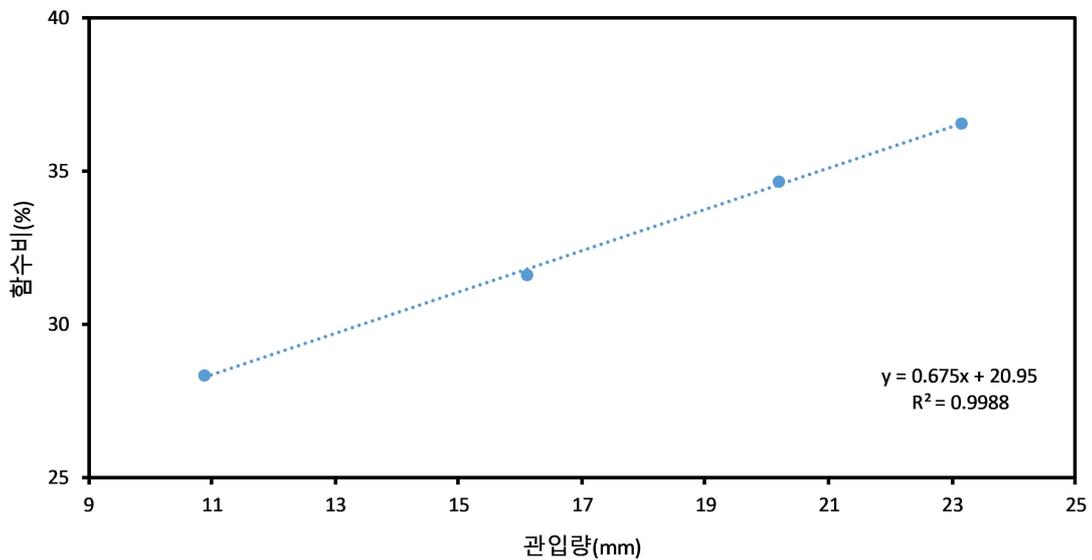


그림 3.3 일라이트 액성한계 시험 결과 예시

### 3.1.4 실험 조건

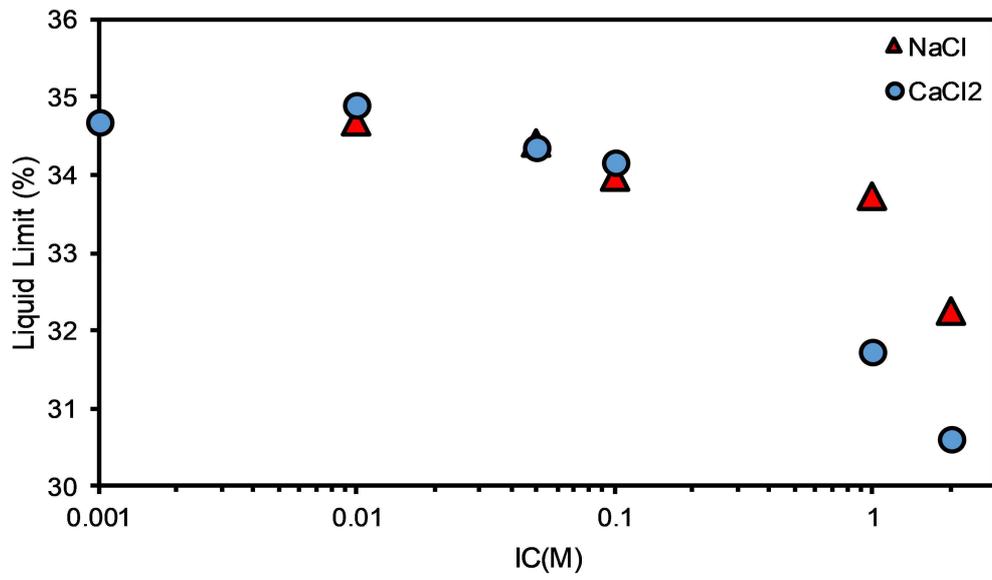
이온농도에 따른 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트의 액성한계를 산정하기 위하여 초순수(deionized water), 0.01, 0.05, 0.1, 1, 2M의 용액과 건조한 점토시료를 혼합하였으며 이온수와 점토입자의 충분한 반응을 유도하고 평형상태에서 액성한계 실험을 수행하기 위하여 각 함수비 마다 시료조성 후 2시간 후에 실험을 수행하였다. 이온농도 조절에는 염화나트륨(NaCl)과 염화칼슘(CaCl<sub>2</sub>)을 이용하였다. 또한 입자의 크기에 따른 점토의 액성한계 평가를 위하여 체가름을 진행하지 않은 시료와 sieve size #200과 #325 이하의 시료로 나누어 추가적인 실험을 수행하였다.

## 3.2 액성한계 시험 결과

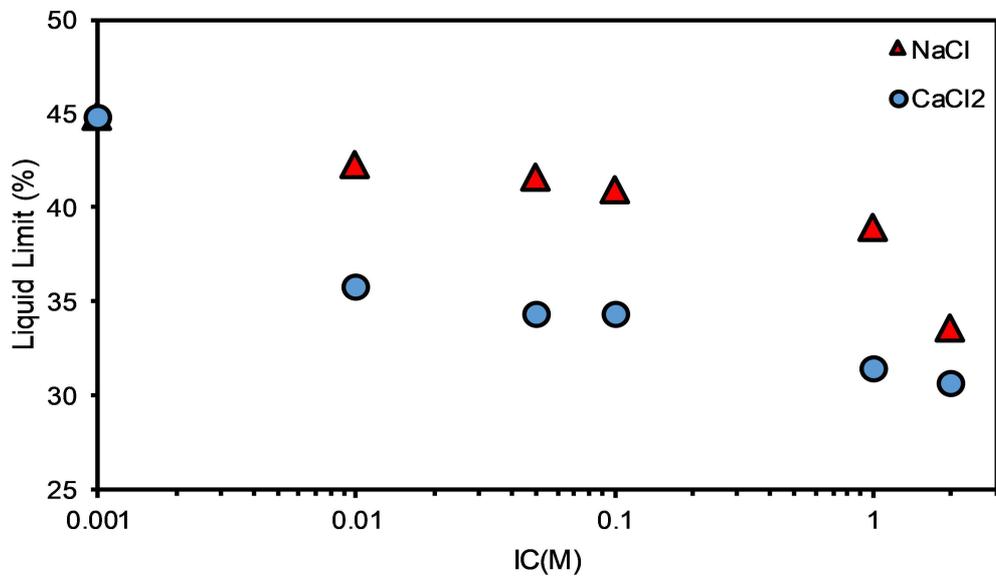
### 3.2.1 이온농도에 따른 점토의 액성한계 변화

그림 3.4는 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트의 NaCl 용액과 CaCl<sub>2</sub>용액에 대한 액성한계 시험 결과 그래프이다. 그림 3.4에 나타난 바와 같이 세 점토광물 모두 이온농도가 증가하면 액성한계가 감소하였다. 또한 NaCl 용액의 액성한계 결과가 CaCl<sub>2</sub>보다 대체적으로 크게 나타났다. 일라이트 시료의 경우 이온농도가 1M 이상일 경우에 NaCl에 대한 액성한계 값이 크게 나타났고 카올리나이트와 벤토나이트의 경우 모든 이온강도 구간에서 NaCl에 대한 액성한계 값이 대체적으로 크게 나타났다. 또한 일라이트와 카올리나이트의 경우 액성한계 감소정도가 벤토나이트에 비해 상대적으로 적게 나타났고, 벤토나이트의 경우 이온농도가 0에서 2M로 증가할 때 액성한계가 70% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

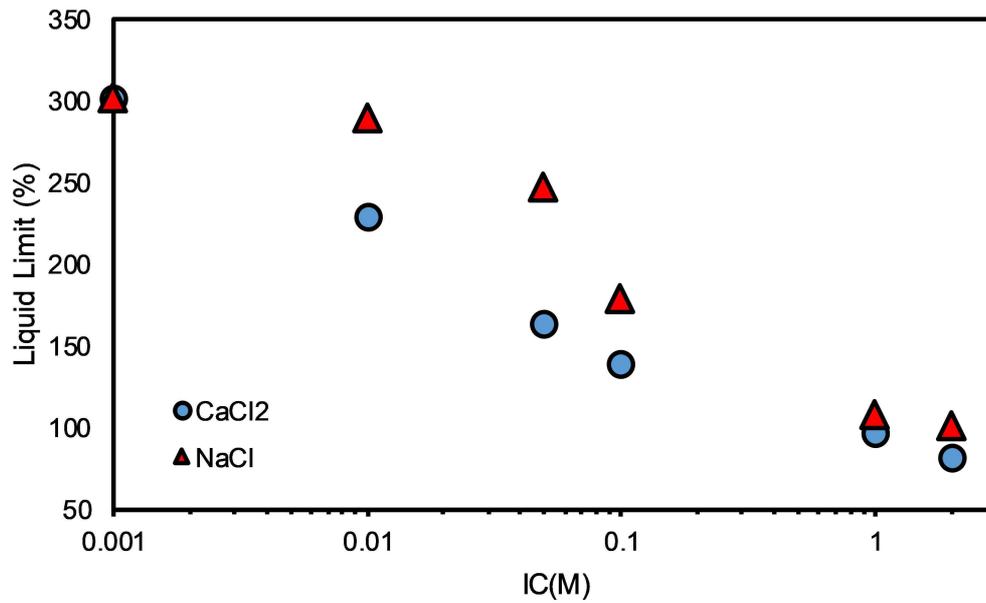
표 3.1은 대표적인 (Baker, M.L. 2017)의 값을 참고하여 점토광물 일라이트와 카올리나이트 벤토나이트의 비표면적(specific surface)과 양이온치환용량(Cation Exchange Capacity)을 나타낸 것이며, 벤토나이트의 경우 카올리나이트나 일라이트에 비해 상대적으로 비표면적이 크고 양이온교환용량이 크기 때문에 매우 큰 이중층수가 입자 주변에 형성되고 따라서 매우 큰 값의 액성한계가 나타난다. 또한 이러한 상대적으로 큰 비표면적 때문에 벤토나이트의 소성성은 이온농도에 매우 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 그림 3.4와 같이 벤토나이트의 액성한계가 이온농도가 증가함에 따라 크게 감소하는 것은 이온농도의 감소가 벤토나이트가 포함된 지반의 소성성을 감소시키고 물성치(투수계수, 전단강도 등)를 크게 변화시킬 수 있음을 의미한다.



(a) 일라이트



(b) 카올리나이트



(c) 벤토나이트

그림 3.4 액성한계 시험 결과

표 3.1 점토광물의 비표면적 및 양이온치환용량(Baker, M.L. 2017)

Edge View	Specific Surface Area (SSA) (m <sup>2</sup> /kg)	Cation Exchange Capacity (CEC) (mEq/100g)
Montmorillonite (incl. Bentonite)	700-800	80-100
Illite	80-120	10-40
Kaolinite	10-15	3-15

표 3.2 이온농도에 따른 액성한계 시험 결과

Material	IC	LL(%)_NaCl	LL(%)_CaCl <sub>2</sub>
Illite	DI	34.67	34.67
	0.01M	34.41	34.90
	0.05M	33.97	34.35
	0.1M	33.72	34.16
	1M	32.25	31.74
	2M	31.45	30.61
Kaolinite	DI	44.77	44.77
	0.01M	42.26	35.77
	0.05M	41.64	34.31
	0.1M	40.94	34.38
	1M	38.88	31.41
	2M	33.58	30.66
Bentonite	DI	301.74	301.74
	0.001M	293.99	295.52
	0.005M	243.21	278.21
	0.01M	230.18	289.46
	0.02M	219.38	268.95
	0.03M	189.19	255.99
	0.05M	163.96	247.71
	0.1M	140.26	179.89
	0.2M	133.25	155.96
	0.4M	120.08	141.13
	0.6M	109.47	123.82
	0.8M	101.14	115.01
	1M	96.88	107.66
2M	81.82	102.04	

DI와 2M 사이의 6가지 이온농도에서 벤토나이트의 이온농도 간 상대적으로 큰 액성한계 값의 차이를 보이기 때문에 본 연구에서는 정확한 액성한계 감소 경향 파악을 위하여 DI와 2M 사이의 6가지 이온농도 이외의 다른 이온농도 조건에서 추가적인 시험을 진행하였고 그 결과를 그림 3.5에 나타내었다. 그림 3.5에서 나타난 바와 같이 이온농도 0에서 0.8M 구간까지의 NaCl과 CaCl<sub>2</sub>에 대한 액성한계 값의 차이가 점점 커지는 반면에 0.8에서 2M 구간까지의 액성한계 값의 차이는 점점 감소하는 결과를 나타내었다. 이를 통하여 벤토나이트의 경우 전자가에 의한 액성한계 값이나 소성성은 이온농도에 따라 그 영향이 상이함을 유추할 수 있다. 벤토나이트 원산지에 따라 광물 구성비가 달라지므로 그림 3.5에서 산정된 이온농도

0.8M에서 최대로 나타나는 액성한계 값의 차이는 벤토나이트 시료 원산지에 따라 다를 것으로 생각된다.

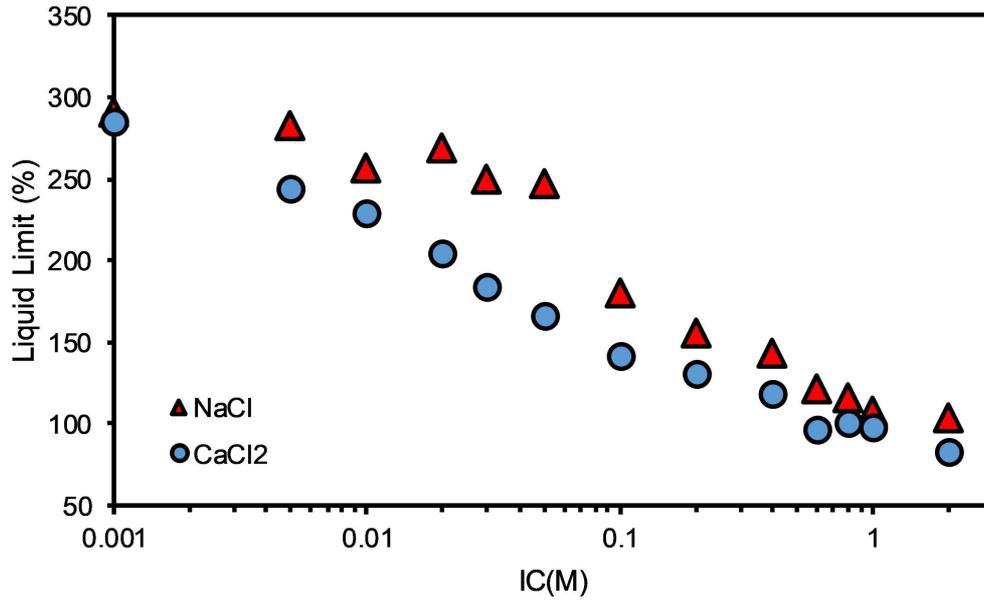


그림 3.5 벤토나이트 액성한계 시험 결과

### 3.2.2 액성한계 값을 이용한 잔류내부마찰각 추정

액성한계를 사용한 잔류내부마찰각 추정공식은 Fang et al. (2019)가 제안한 식 Eq 3.1을 이용하였다. Eq 3.1는  $LL < 100$ 의 조건을 사용하는 공식으로 일라이트와 카올리나이트의 액성한계 값을 이용하여 잔류내부마찰각을 아래 표 3.3과 같이 산정하였다.

$$\phi_r = -0.9031LL + 51.726 \quad \text{Eq 3.1}$$

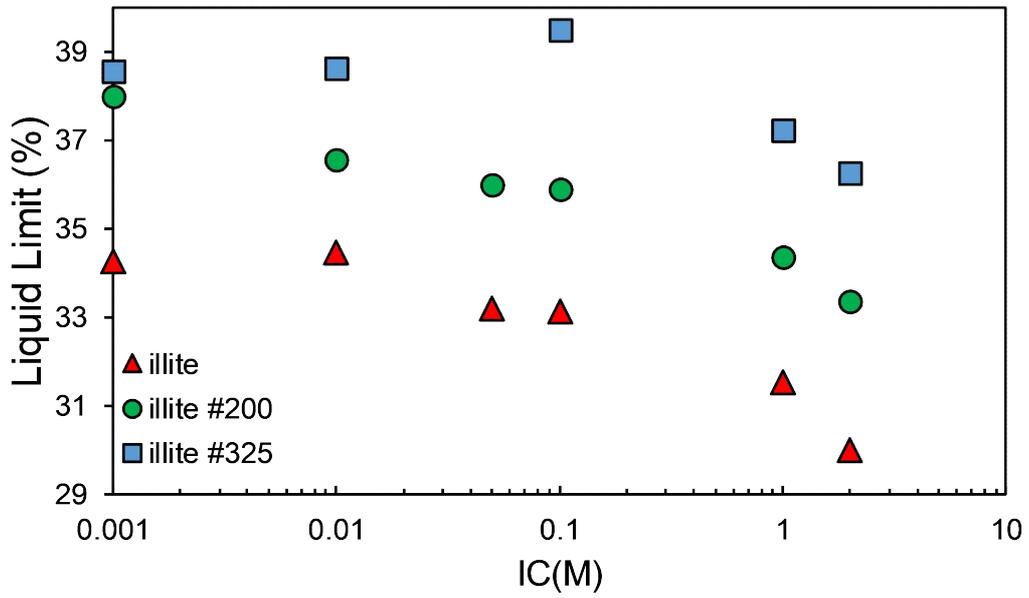
표 3.3 액성한계 값을 이용한 내부마찰각 산정(Illite, Kaolinite)

Material	IC	$\Phi_r(^{\circ})_{NaCl}$	$\Phi_r(^{\circ})_{CaCl_2}$
Illite	DI	20.42	20.42
	0.01M	20.65	20.21
	0.05M	21.05	20.70
	0.1M	21.27	20.88
	1M	22.60	23.06
	2M	23.32	24.08
Kaolinite	DI	11.29	11.29
	0.01M	13.56	19.42
	0.05M	14.12	20.74
	0.1M	14.75	20.68
	1M	16.61	23.36
	2M	21.40	24.04

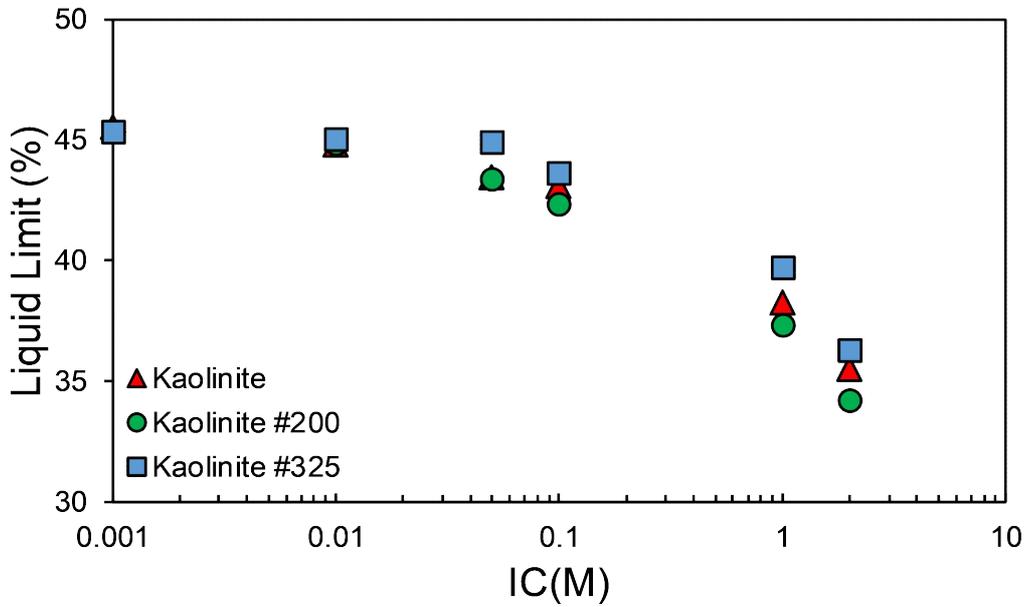
### 3.2.3 입자 크기에 따른 점토의 액성한계 변화

아래의 그림 3.6과 그림 3.7은 점토입자의 크기에 따른 액성한계 변화를 보기 위하여 체에 거르지 않은 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트의 액성한계값과 #200, #325번체를 통과한 시료를 NaCl과 CaCl<sub>2</sub>용액을 사용하여 액성한계 시험 결과이다.

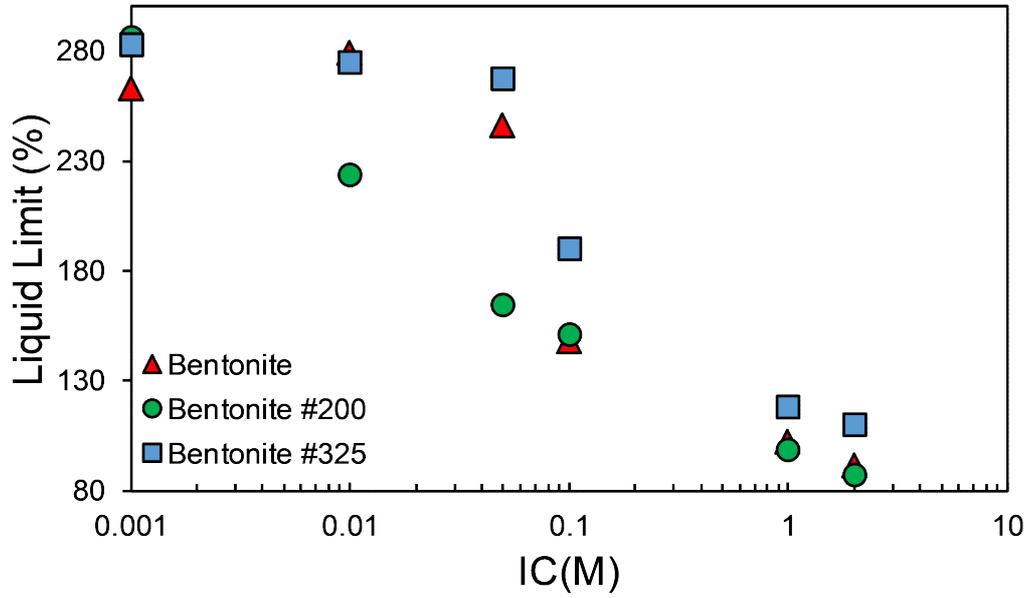
입자 크기에 따른 액성한계 시험 결과 점토 입자의 입경이 작을수록 액성한계의 값은 큰 입자의 액성한계 보다 큰 값을 보이고 있으며, 카올리나이트의 경우 입자의 크기에 따른 차이가 미미한 것을 확인할 수 있다. 이는 입경의 크기에 따른 액성한계 값은 점토광물의 종류에 따라 다르다는 것을 의미하며 1가의 양이온인 NaCl용액과 2가의 양이온 용액인 CaCl<sub>2</sub>의 차이는 미비하게 나타났다.



(a) 일라이트 시험 결과

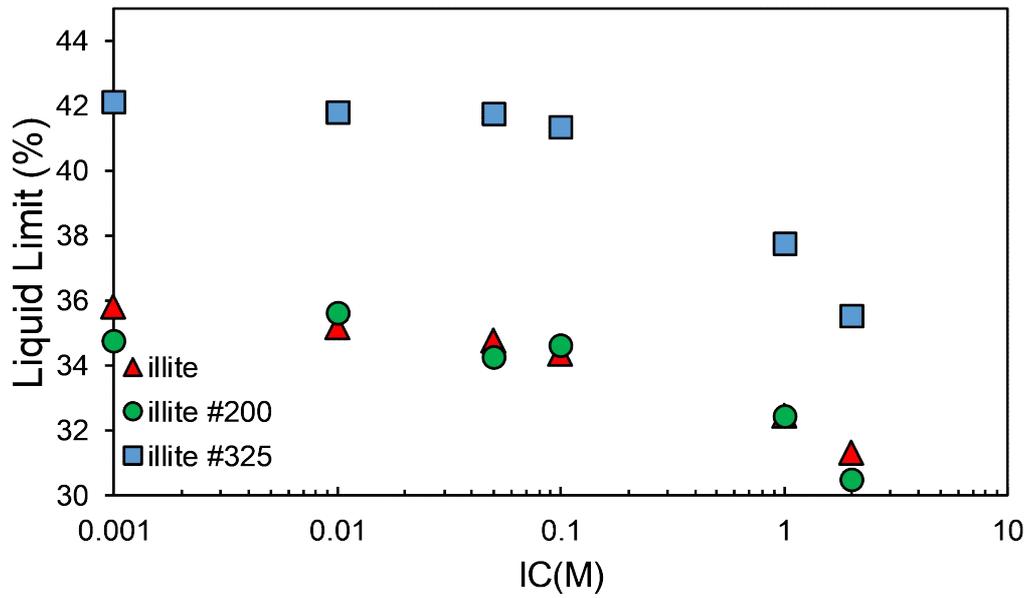


(b) 카올리나이트 시험 결과

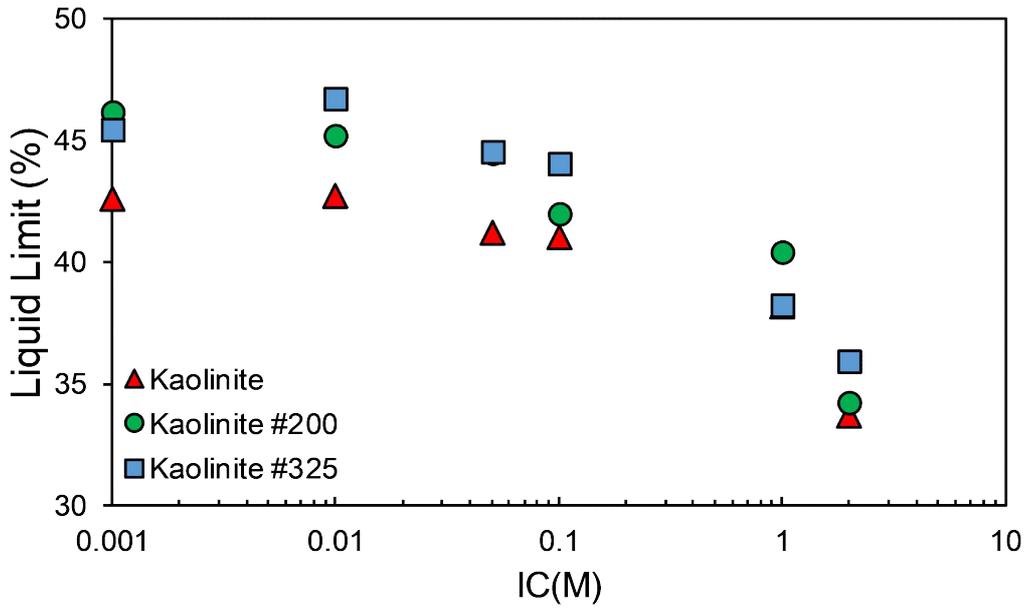


(c) 벤토나이트 시험 결과

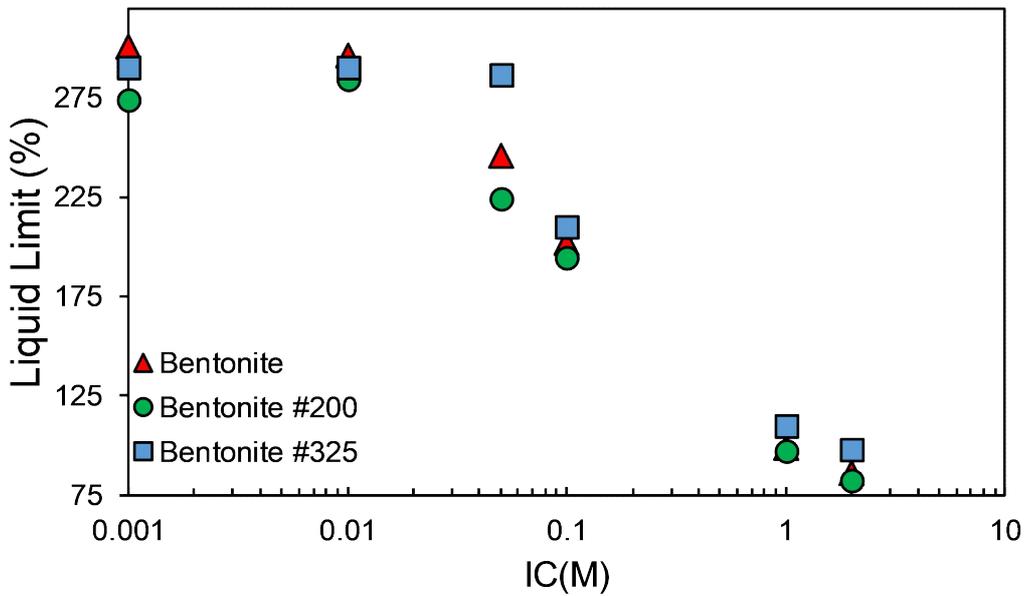
그림 3.6 NaCl용액을 이용한 입경 별 액성한계 시험 결과



(a) 일라이트 시험 결과



(b) 카올리나이트 시험 결과



(c) 벤토나이트 시험 결과

그림 3.7 CaCl<sub>2</sub>용액을 이용한 입경 별 액성한계 시험 결과

### 3.3 소성한계 시험 결과

#### 3.3.1 이온농도에 따른 점토의 소성한계 변화

본 연구에서 잔류 내부마찰각을 산정하기 위해 필요한 소성지수를 구하기 위하여 이온농도에 따른 소성한계 시험(ASTM D4318-84, 2010)을 수행하였다. 반죽된 시료를 손바닥으로 밀어 지름 3.2mm의 굽기에서 부서지기 시작할 때의 함수비를 소성한계로 산정하였으며, 시료별 NaCl용액을 이용한 두 가지의 이온농도 조건(초순수(DI)와 2M)에서 3번씩 측정하여 시험을 수행하였다. 벤토나이트의 경우 이온농도에 따른 액성한계의 차이가 크게 나타나므로 각 이온농도에서 소성한계 값을 산정하였다. 각 시험은 이온수와 점토입자의 충분한 반응을 유도하기 위하여 평형 상태 이후에 실험을 수행하기 위하여 시료 조성 후 2시간을 대기하여 진행하였다. 시험 결과 소성한계의 값은 아래 표 3.4와 같다.

표 3.4 NaCl 용액을 이용한 소성한계 시험 결과

Material	IC	PL	PI
Illite	DI	25.56	9.11
	2M	21.79	8.82
Kaolinite	DI	29.82	14.95
	2M	25.86	4.8
Bentonite	DI	91.3	210.44
	0.01M	82.01	207.73
	0.05M	75.51	172.2
	0.1M	72.72	107.17
	1M	63.43	44.23
	2M	60.63	41.41

이온농도가 커짐에 따라 소성한계 값도 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 소성지수 또한 감소하는 결과가 나타났다.

#### 3.3.2 소성지수 값을 사용한 잔류내부마찰각 추정

소성지수를 사용한 잔류내부마찰각 추정 공식은 Kanji (1974)가 제안한 식 Eq. 3.2를 이용하였고, 이는 벤토나이트의 경우 액성한계(LL)의 값이 100보다 크기 때

문이다. 산정결과는 아래의 표와 같다.

$$\phi_r = 46.6/IP^{0.446} \quad \text{Eq. 3.2}$$

표 3.5 벤토나이트의 잔류내부마찰각 산정 결과

Material	IC	$\phi_r(^{\circ})$
Bentonite	DI	4.29
	0.01M	4.31
	0.05M	4.69
	0.1M	5.79
	1M	8.60
	2M	8.85

표 3.4와 표 3.5와 같이 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트 모두 이온농도에 따라 액성한계값이 감소하는 경향을 볼 수 있으며, 액성한계 값이 감소함에 따라 산정된 잔류내부마찰각은 증가하는 결과를 볼 수 있다.

## 제 4 장 점토사면의 사면안정 수치해석

### 4.1 시험결과를 이용한 사면안정 수치해석

본 연구에서 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 안전성을 평가하는 방법으로 높은 SRF는 파괴까지의 강도감소비가 큰 것을 의미한다. 따라서 높은 SRF는 안전율이 큰 사면을 의미한다. 본 연구에서는 SRF를 1부터 0.05 간격으로 증가시키면서 사면의 파괴가 일어날 때까지 반복계산을 수행하여 파괴 시 최종 SRF를 주어진 조건에서의 수치해석 결과값으로 산정하였다. SRF를 이용한 유발 점착력( $c_m$ )과 내부마찰각( $\phi_m$ )을 아래와 Eq 4.1과 같이 정리하였다.

$$c_m = \frac{c}{SRF},$$
$$\phi_m = \text{atan}\left(\frac{\tan(\phi_u)}{SRF}\right) (p < 0) + \text{atan}\left(\frac{\tan(\phi_s)}{SRF}\right) (p > 0) \quad \text{Eq 4.1}$$

여기서  $c$ (KPa)는 점토의 점착력,  $\phi_u$ 는 불포화상태에서의 내부마찰각,  $\phi_s$ 는 포화상태에서의 내부마찰각,  $p$ (KPa)는 간극수압이다. 따라서 포화상태( $\phi_u = 0$ )에서의 안전율(FS)은 아래의 Eq 4.2와 같이 정의된다.

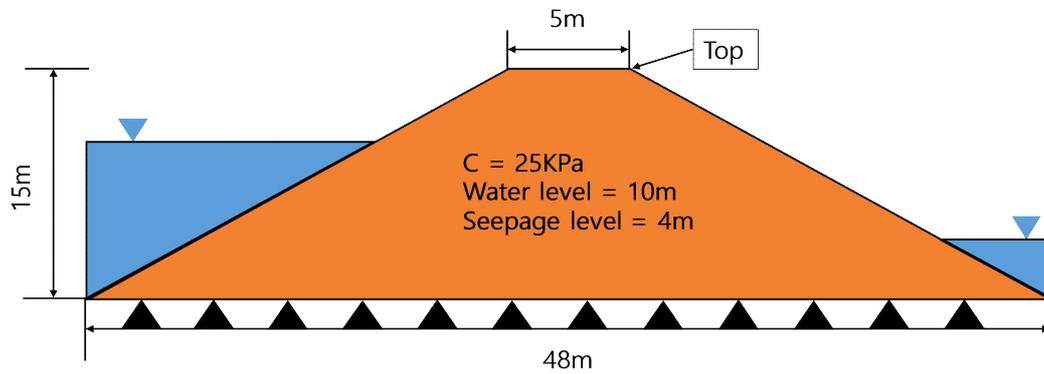
$$FS = SRF = \frac{\tau_f}{\tau_m} = \frac{c + \sigma_n \tan \phi_s}{c_m + \sigma_n \tan \phi_m} \quad \text{Eq 4.2}$$

#### 4.1.1 COMSOL 사면안정 수치해석 모델

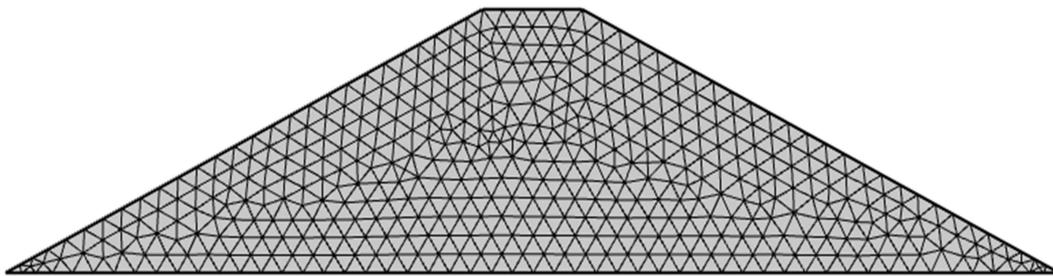
본 연구에서 사용된 모델은 사면의 경사 각도에 따른 사면안정 수치해석 모델과 배면 수위의 높이에 따른 사면해석 총 2가지 모델에 대하여 수치해석을 진행하였으며, 사용된 모델의 geometry 및 mesh, 해석 결과는 아래의 그림과 같다.

아래의 그림 4.1은 배면수위의 높이에 따른 사면의 안정성을 보기 위한 모델로 수위의 높이를 10m에서 6m까지 1m간격으로 감소시켜가며 수치해석을 진행하였으며 그림 4.2는 사면의 경사각도에 따른 사면의 안정성을 보기 위하여 사면의 경사각도를 15° 에서 45° 까지 5° 간격으로 증가시켜 가며 수치해석을 진행하였다.

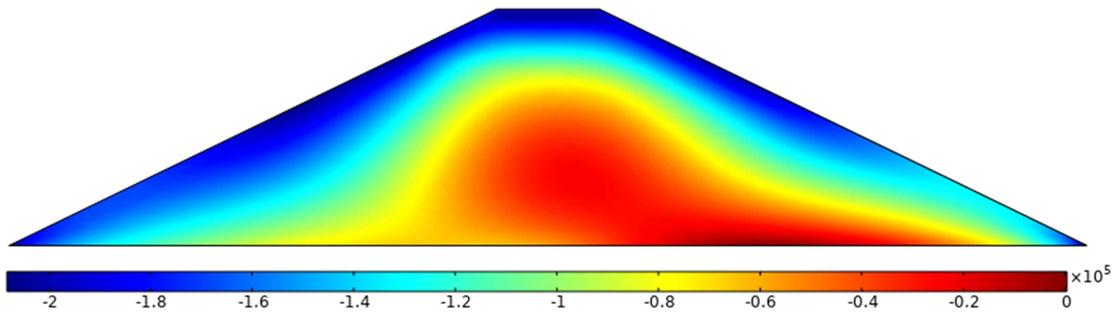
두 가지 모델 모두 강도감소기법을 이용하여 수치해석을 수행하였다.



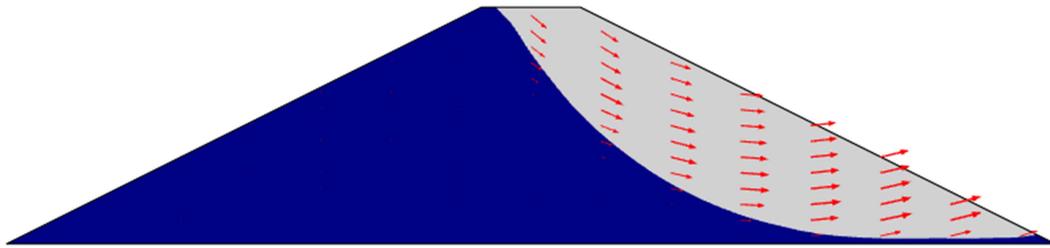
(a) 사면안정 수치해석 모델 구성



(b) mesh

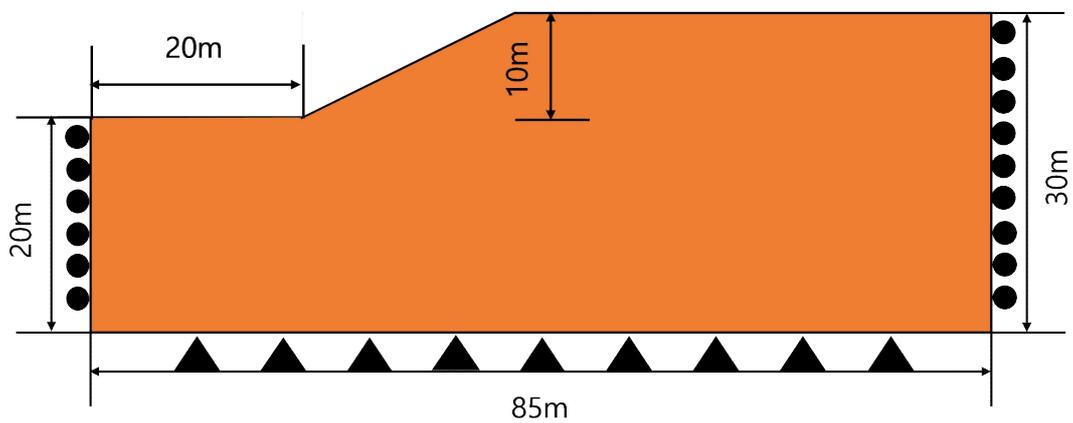


(c) von mises stress

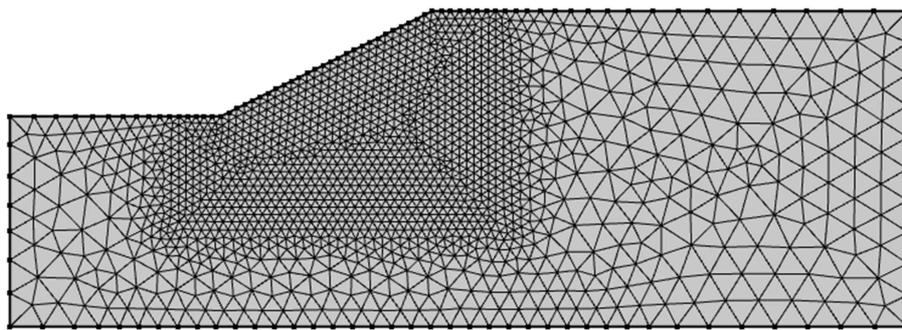


(d) 최대 SRF에서 slip surface

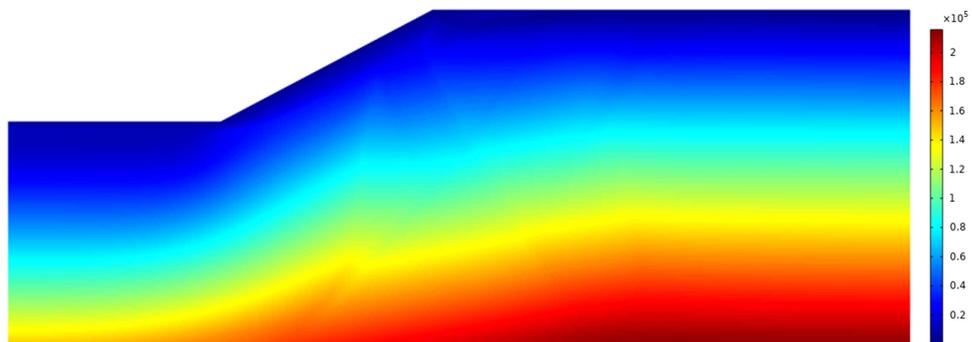
그림4.1 배면수위에 따른 사면안정 수치해석



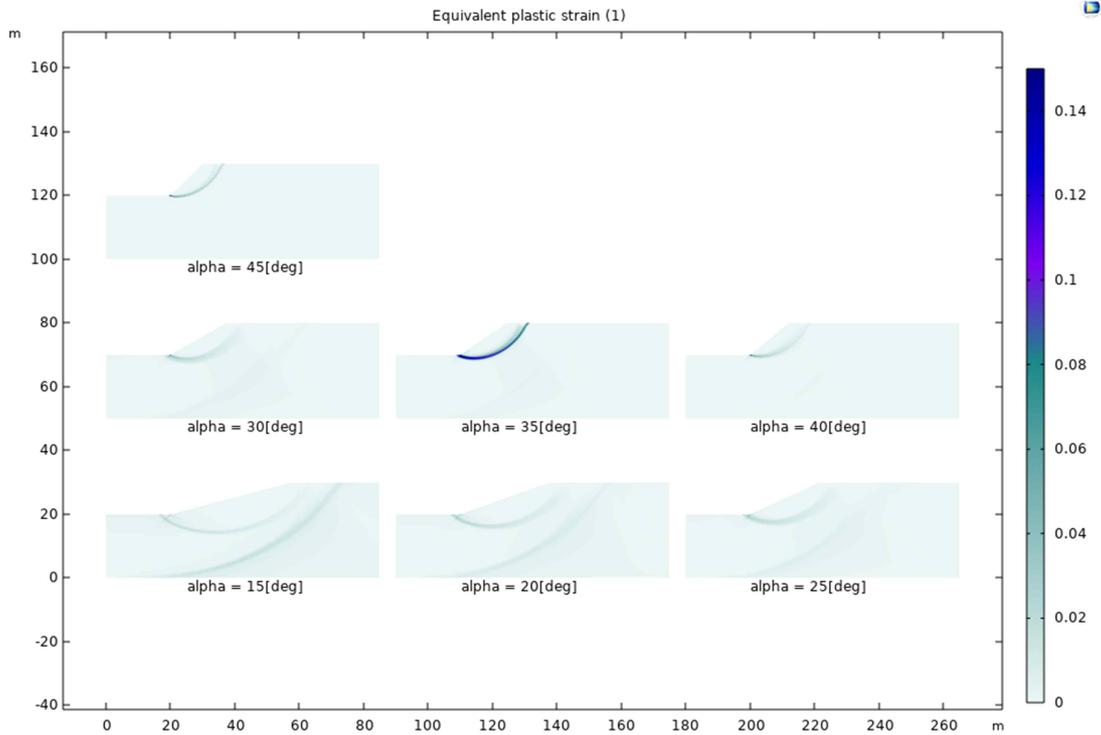
(a) 사면안정 수치해석 모델 구성



(b) mesh



(c) von mises stress



(d) 경사 각도에 따른 slip surface

그림 4.2 경사 각도에 따른 사면안정 수치해석

수치해석에 사용되는 물성치는 아래의 표 4.1과 같으며, 점착력( $c$ )과 탄성계수( $E$ ), 포아송비( $\nu$ )는 Rayhani(2008)에 제안된 값을 사용하였으며 각 시료의 비중은 비중시험을 진행하여 3번의 평균을 나타낸 결과이다.

표 4.1 Material properties (Rayhani (2008))

	Unit Weight ( $\text{kgf/m}^3$ )	$c$ (kPa)	$E$ (MPa)	$\nu$	$G_s$
Illite	2890	90	45	0.42	2.89
Kaolinite	2700	90	45	0.42	2.70
Bentonite	2680	50	24	0.43	2.68

## 4.2 사면안정 예제 및 검증

### 4.2.1 Bishoip의 간편법을 이용한 검증

사면안정 해석 진행에 앞서 사면안정 해석 모델에 대한 검증을 위하여 Bishop & Morgenstern (1960)의 안전율 차트를 COMSOL을 이용한 사면안정 수치해석 결과와 비교하였다. 사면의 경사는 2:1, 3:1, 4:1, 5:1 총 4가지의 경사에서 수치해석을 진행하였다. 아래의 그림은 2:1 경사에서의 수치해석결과로 나온 total displacement를 나타낸 것이다.

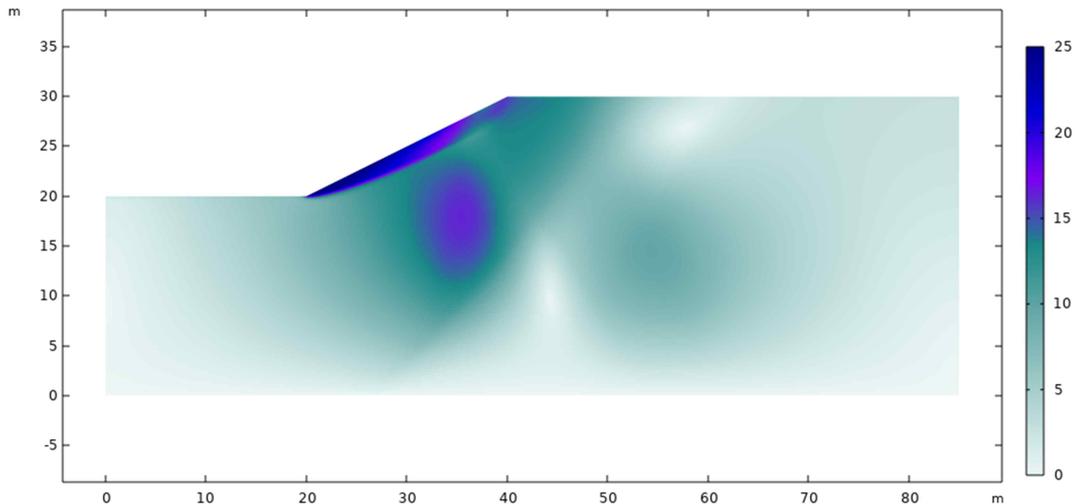


그림 4.3 2:1 경사에서 사면의 total displacement

아래의 그림 4.4는 사면안정 수치해석 결과 SRF값에 따른 displacement를 나타내어 파괴에 도달하여 수치해석이 끝났을 때의 값을 FOS(Factor of safety)라고 하며, Bishop & Morgenstern (1960)의 안전율 차트에서의 2:1경사에서 안전율 1.155와 비교하여 나타낸 그래프이며 COMSOL을 이용한 사면안정 2:1 경사에서 수치해석 결과 안전율은 1.17로 이론적 결과인 1.155와는 근사한 결과가 도출되었다.

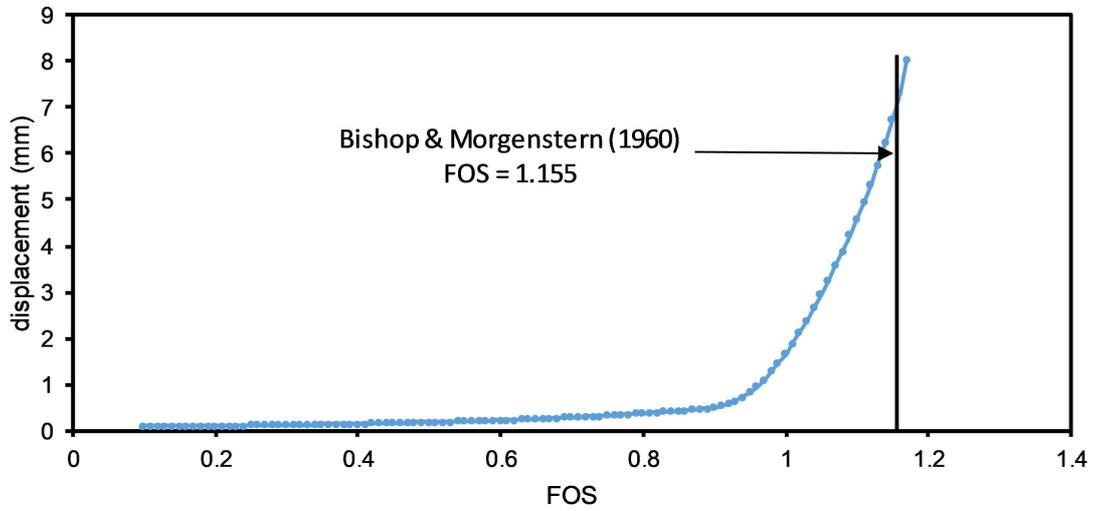


그림 4.4 2:1 경사에서 이론값과 사면안정 수치해석 결과 안전을 비교

표 4.2 사면경사에 따른 이론값과 수치해석 결과

slope angle	FOS_theoretical	FOS_numerical
2:1	1.155	1.17
3:1	1.732	1.8135
4:1	2.309	2.4235
5:1	2.887	3.0275

강도감소기법을 이용한 사면안정 모델의 검증을 위한 수치해석 결과 사면의 경사 각도가 5:1에서 2:1로 증가할수록 사면의 안전율은 감소하는 것을 확인하였으며, Bishop & Morgenstern (1960)의 이론적 해의 차이는 근사하다는 결과를 확인하였고 이온농도에 따른 시료의 잔류내부마찰각을 parameter로 수치해석을 수행하였다.

#### 4.2.2 사면의 크기에 따른 검증

사면의 크기에 따른 결과를 보기 위하여 model의 크기를 키우고 사면의 경사와 경계조건 및 물성치는 동일한 조건에서 수치해석을 진행하였다. 사면의 크기는 아래의 그림 4.5와 같으며 수치해석 수행하였다.

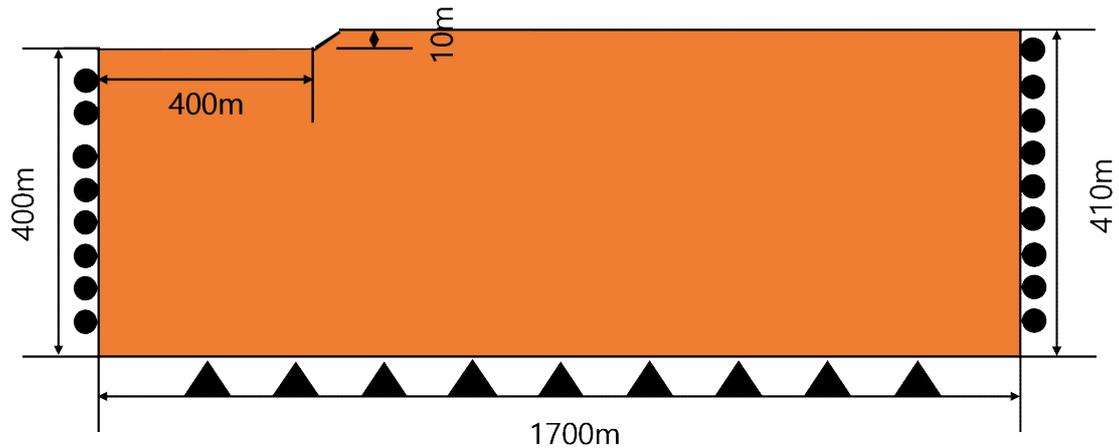


그림 4.5 검증용 사면의 모델 구성

수치해석 진행 결과 displacement는 아래의 그림 4.6과 같이 나타났다. 이러한 이유는 사면의 전단강도를 감소시켜가며 수치해석을 진행 하였을 때 Toe부분에서의 변위량(displacement)이 maximum displacement 기준 수치 이상으로 발생하기 때문에 수치해석이 멈추게 되어 그림 4.6과 같은 결과가 도출되었다.

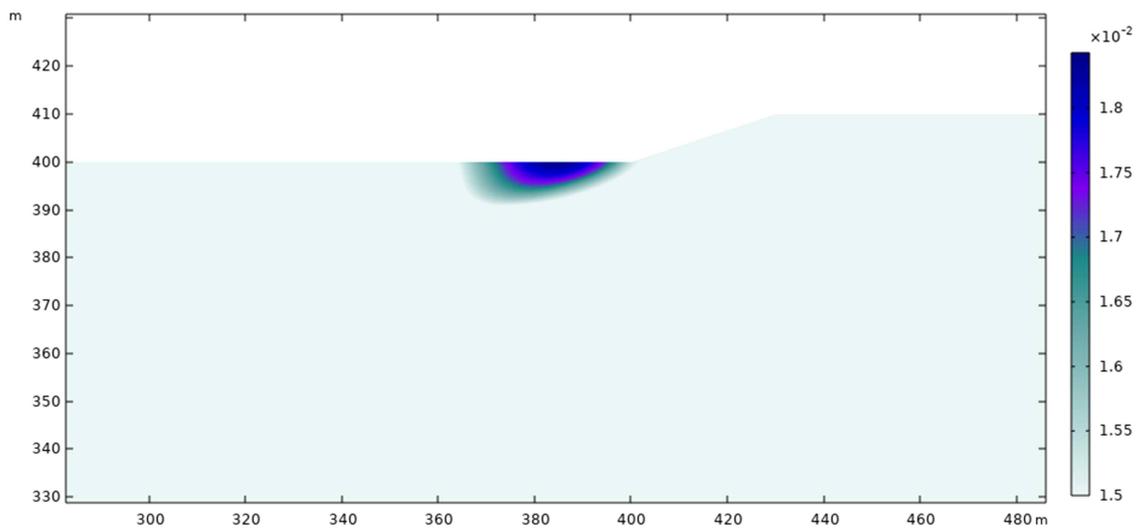


그림 4.6 3:1 경사에서 total displacement

사면의 경사 각도에 따른 사면의 안전율은 아래의 표 4.3과 같다. 해석 결과 Bishop & Morgenstern (1960)의 안전율 차트와 상당히 다른 결과가 도출되었다. 이는 사면의 크기에 따른 수치해석 진행 결과 사면의 크기에 따른 maximum displacement의 조건을 수정하지 못하여 비교적 큰 사면에서의 수치해석에서의 문제점을 해결하지 못하여 본문의 그림 4.3으로 수치해석을 진행하였다.

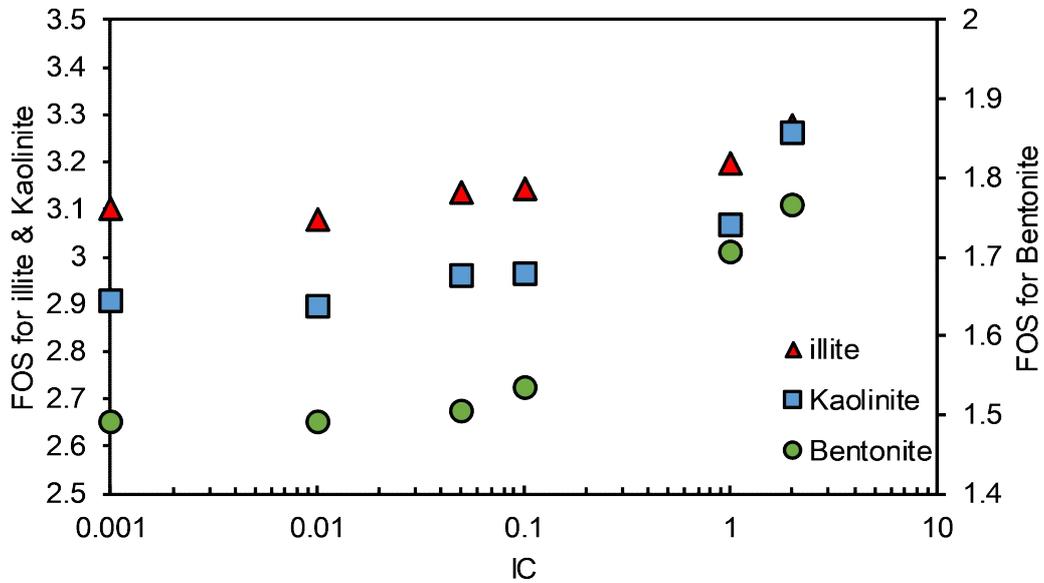
표 4.3 사면의 크기와 경사에 따른 이론값과 수치해석 결과

slope angle	FOS_theoretical	FOS_numerical
2:1	1.155	1.0725
3:1	1.732	1.1225
4:1	2.309	1.145
5:1	2.887	1.16

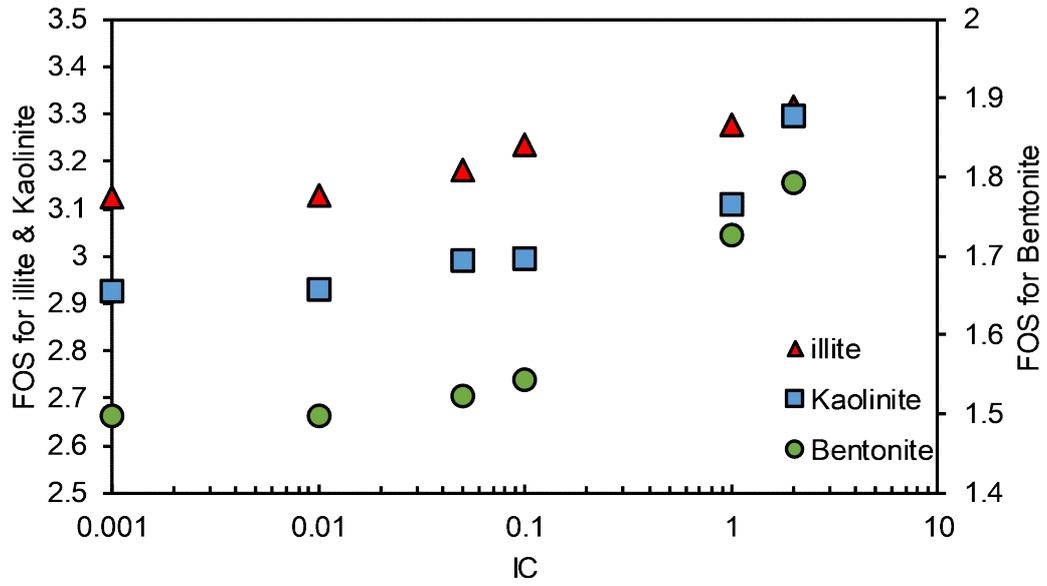
### 4.3 사면안정 수치해석 결과

#### 4.3.1 배면 수위 높이에 따른 사면안정 해석 결과

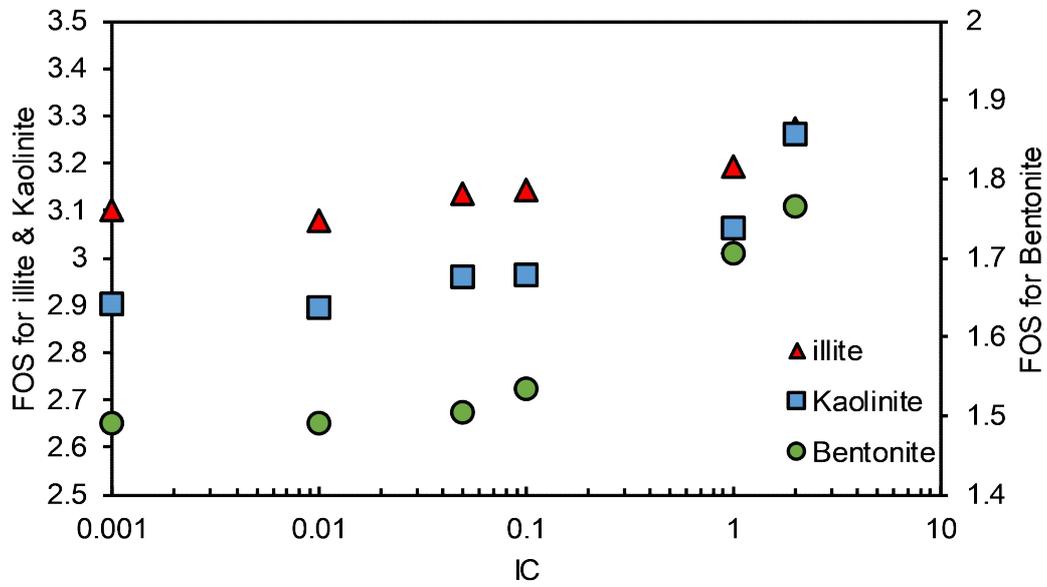
아래 그림 4.7과 같이 이온농도와 배면 수위 높이에 따른 사면안정 수치해석 수행 결과 이온농도가 증가함에 따라 동일한 배면 수위 높이에서 사면의 안전율 (SRF)은 증가하는 경향을 보인다.



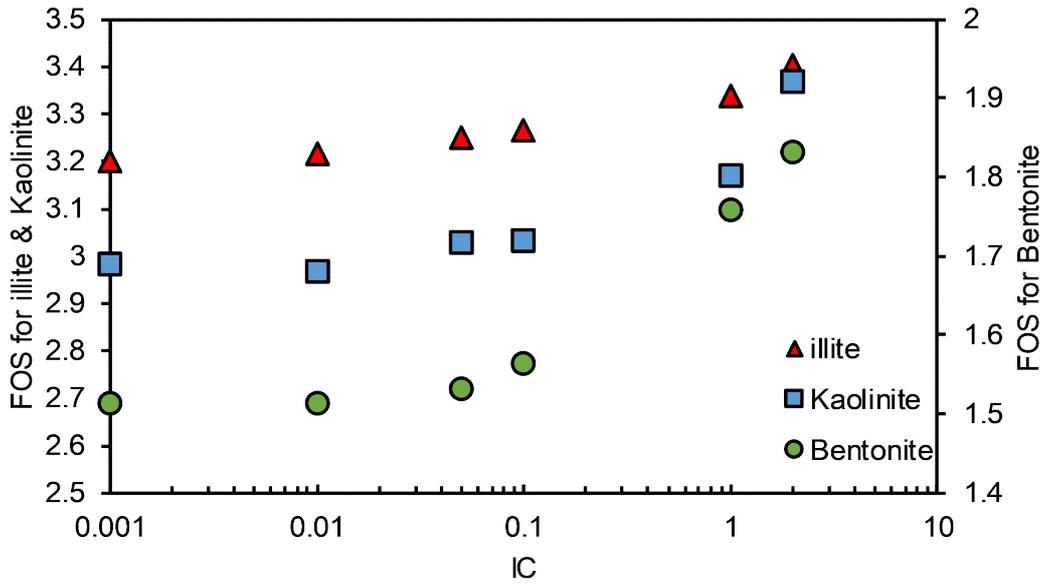
(a) DH = 10m



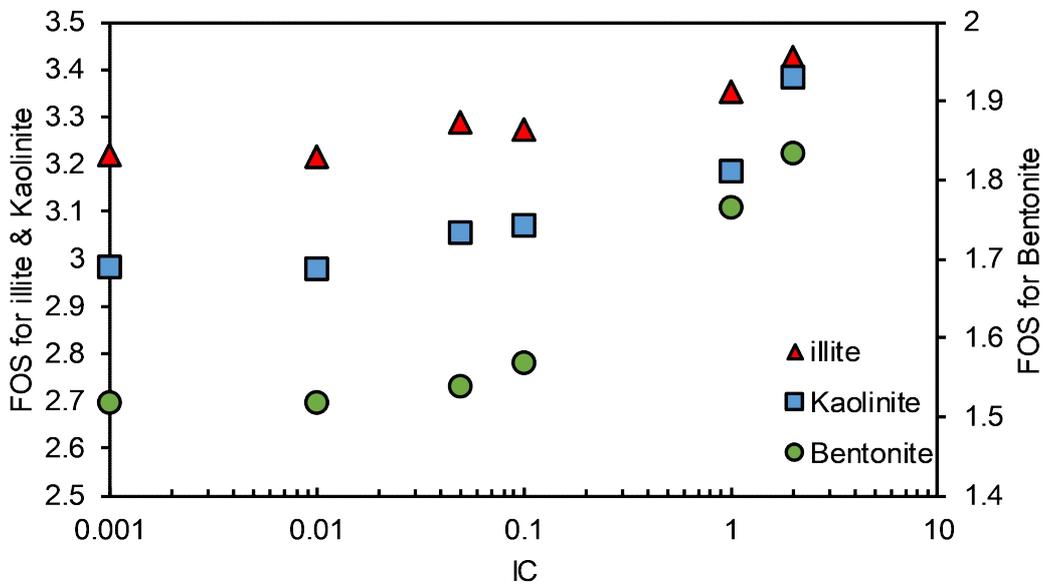
(b) DH = 9m



(c) DH = 8m



(d) DH = 7m



(e) DH = 6m

그림 4.7 배면수위에 따른 사면안정 수치해석 결과

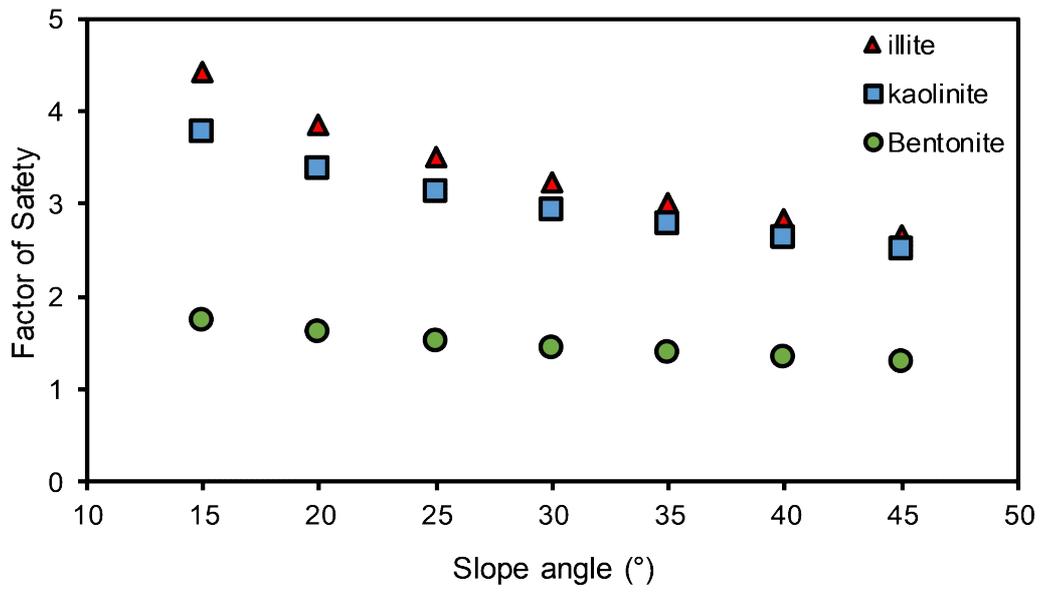
수치해석 수행 결과 벤토나이트 DI와 0.01M을 제외한 case는 일반적인 사면안정에 대한 안전율 1.5보다 큰 FOS값이 도출되었기 때문에 본 연구에서 수행된 수치해석 case는 이온농도에 상관없이 모두 사면붕괴에 대해 안전하다는 것을 확인할 수 있었으며 이온농도가 증가함에 따라 FOS값이 증가하는 것은 이온농도가 감소하게 되면 점토를 포함한 지반의 사면안정성 저하를 초래할 수 있다는 것을 의미

한다. 사면의 경사각이 커지거나 강우를 고려하게 되면 안전율은 감소하게 될 것이며 1.5보다 작은 안전율이 산출될 가능성이 있다. 특히 낮은 이온농도에서 상대적으로 작은 안전율은 강우에 따라 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 벤토나이트를 포함한 지반의 경우 강우에 따른 간극수의 이온농도 변화를 사면안정 해석에 고려하여야 함을 의미한다.

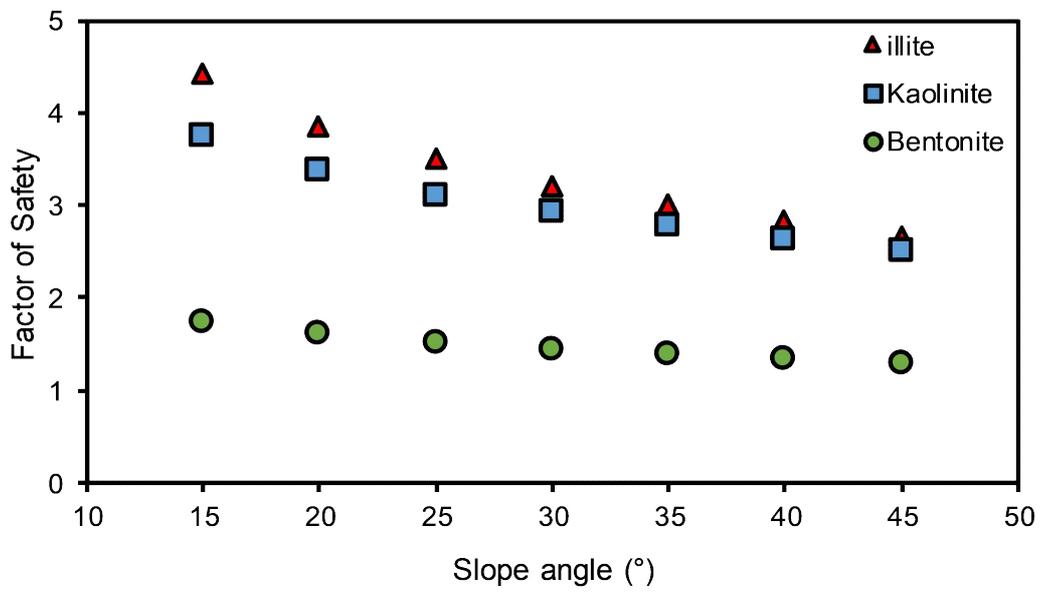
#### 4.3.2 경사 각도에 따른 사면안정 해석 결과

이온농도와 사면의 경사 각도에 따른 안전율을 비교하기 위하여 사면의 경사 각도를 15° 에서 45° 까지 5° 의 간격으로 총 7가지에 대하여 사면안정 수치해석 진행 결과는 아래의 그림과 같이 나타났다.

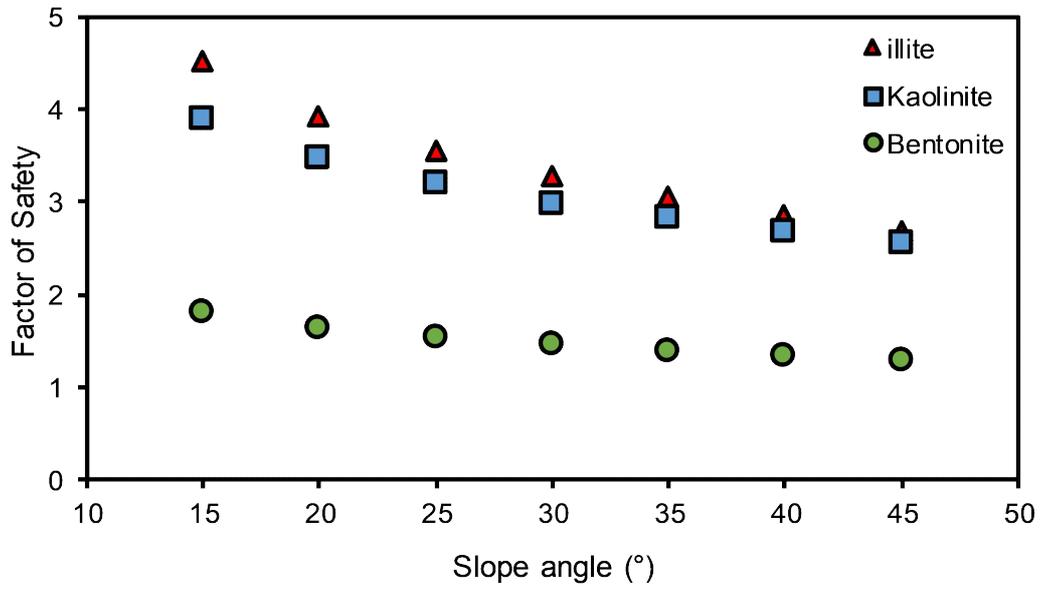
수치해석 진행 결과 사면의 경사 각도가 증가함에 따라 안전율(FOS)은 감소하고 이온농도가 커짐에 따라 input data로 들어가는 내부마찰각이 커져 사면의 안전율은 증가하는 결과가 도출되었으며 DI와 2M의 이온농도에서 사면의 경사 각도에 따른 안전율의 차이는 2M의 이온농도에서 사면의 경사 각도가 15° 에서 45° 로 커짐에 따라 증가하는 결과가 도출되었다.



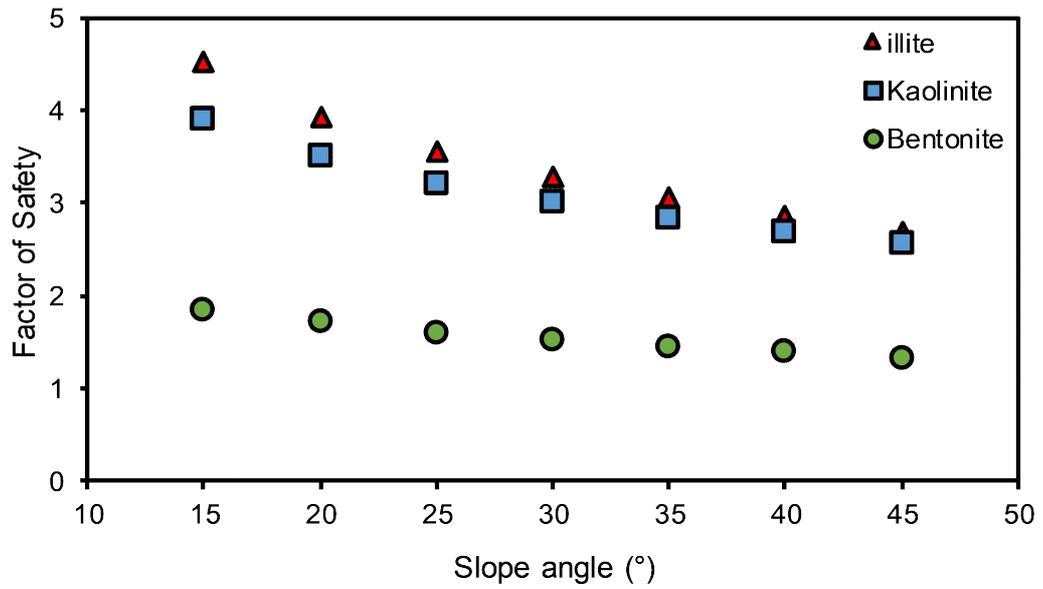
(a) DI



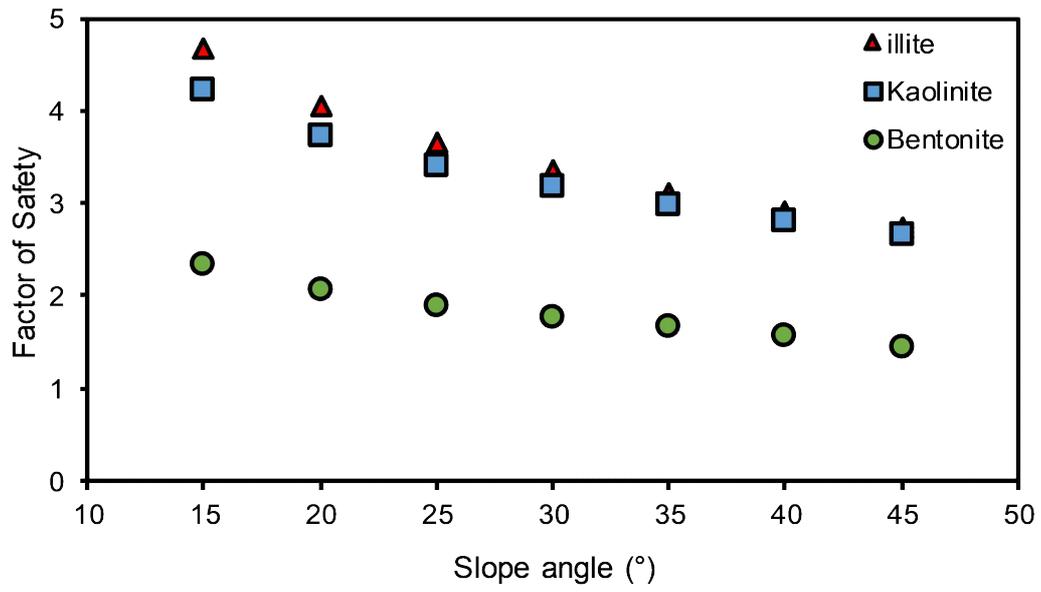
(b) 0.01M



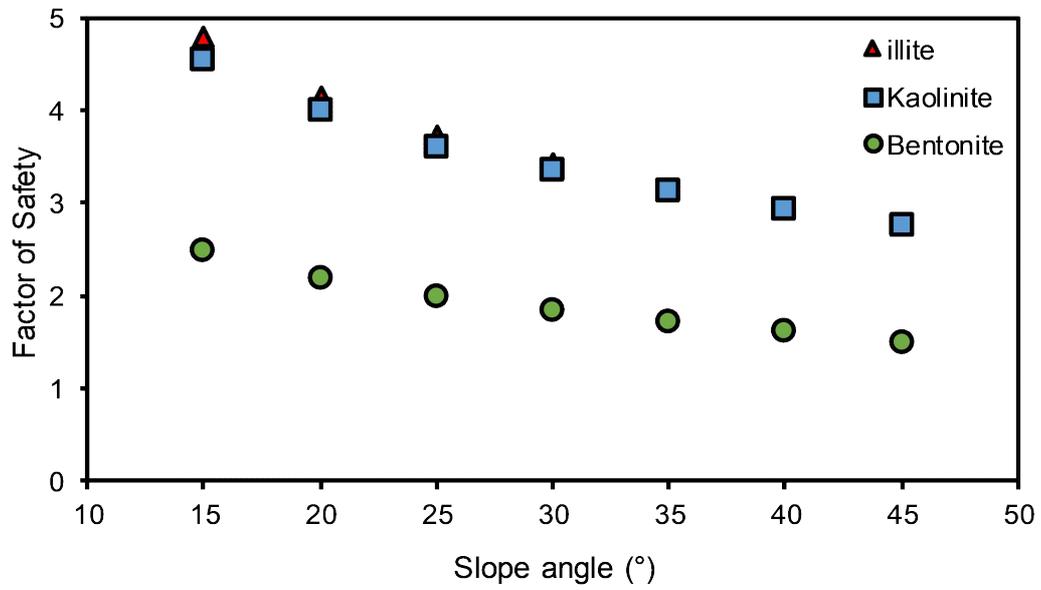
(c) 0.05M



(d) 0.1M



(e) 1M



(f) 2M

그림 4.8 이온농도와 경사 각도에 따른 사면의 안전율

## 제 5 장 결론

본 연구는 대표적인 점토광물 일라이트, 카올리나이트, 벤토나이트를 이온농도 (DI, 0.01M, 0.05M, 0.1M, 1M, 2M)와 이온의 가수(NaCl, CaCl<sub>2</sub>)에 따른 액성한계를 Fall Cone Test를 이용하여 산정하고 결과를 고찰하였다. 또한 산정된 액성한계 값을 이용하여 이온농도 조건에 따른 점토의 내부마찰각을 공식을 이용하여 추정하고 이를 이용하여 사면안정 수치해석의 입력값으로 사용하여 이온농도에 따른 사면의 안전율 변화를 고찰하였다. 사면안정해석은 유한요소 수치해석 프로그램인 Comsol Multiphysics를 이용하여 안전율을 산정하였고 강도감소기법을 적용하여 파괴시까지 수치해석을 수행하여 배면 수위 높이에 따른 사면의 안전율과 사면의 경사 각도에 따른 안전율을 도출하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 3가지 시료는 2가지의 이온 가수(NaCl, CaCl<sub>2</sub>)에서 이온농도가 커짐에 따라 액성한계가 감소하였다. 이는 이온농도가 커짐에 따라 점토의 이중층수가 감소하여 같은 함수비에서 콘의 관입에 대한 전단저항이 상대적으로 적음을 뜻하며 이는 상대적으로 비표면적이 큰 벤토나이트에서 가장 크게 나타났다.
- (2) 경험식을 이용하여 산정된 내부마찰각은 이온농도가 감소할수록 감소하는 결과를 보였으며 이를 적용한 2가지 수치해석 결과로 도출된 사면의 안전율은 이온농도가 감소할수록 감소하는 것으로 나타났다. 이는 이온농도 변화에 민감한 점토를 포함한 지반의 사면안정 해석 시, 강우나 간극수 흐름에 따른 이온농도 변화를 고려해야 함을 뜻한다.
- (3) 수치해석을 이용하여 산정된 사면의 안전율은 이온농도가 증가함에 따라 안전율은 증가했고 1M과 2M에서의 안전율의 차이는 그 이하의 이온농도의 차이보다 상대적으로 적은 차이가 났다. 이는 해수와 인접한 지역에서는 점토가 함유된 지반의 사면안정성 예측에는 간극수의 화학적 성질이 동반되어야 함을 의미한다.

## 참 고 문 헌

1. 고상모, 손병국, 송민섭, 박성환, & 이석훈. (2002). 벤토나이트의 물리-화학적 성질을 지배하는 요인분석. 한국광물학회지, 15(4), 259-272.
2. Tiwari, B., & Ajmera, B. (2015). Reduction in fully softened shear strength of natural clays with NaCl leaching and its effect on slope stability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1), 04014086.
3. 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.
4. Griffiths, D.V., and Lane, P.A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, Vol. 49, No. 3, pp. 387-403.
5. Grim, R. E. (1962). Clay Mineralogy: The clay mineral composition of soils and clays is providing an understanding of their properties. *Science*, 135(3507), 890-898.
6. Bhattacharyya, K. G., & Gupta, S. S. (2008). Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: a review. *Advances in colloid and interface science*, 140(2), 114-131.
7. Sridharan, A., & Jayadeva, M. S. (1982). Double layer theory and compressibility of clays. *Geotechnique*, 32(2), 133-144.
8. Casagrande, A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils. *Public roads*, 13(8), 121-136.

9. Casagrande, A. (1948). Classification and identification of soils. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113(1), 901–930.
10. Duncan, J. M. (1996). State of the art: limit equilibrium and finite–element analysis of slopes. Journal of Geotechnical engineering, 122(7), 577–596.
11. Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Geotechnique, 5(1), 7–17.
12. ASTM D422. (2007). Standard test method for particle-size analysis of mudrocks. ASTM 04.08 Mudrock and Rock, 1.
13. ASTM D 854. (1999). Standard test method for specific gravity of soils. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials.
14. BSI (1990). Methods of test for soils for civil engineering purposes. BS 1377.
15. ASTM, D. (2010). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. D4318–10.
16. Baker, M. L., Baas, J. H., Malarkey, J., Jacinto, R. S., Craig, M. J., Kane, I. A., & Barker, S. (2017). The effect of clay type on the properties of cohesive sediment gravity flows and their deposits. Journal of Sedimentary Research, 87(11), 1176–1195.

17. 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
18. Kanji, M.A. (1974). The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils. *Geotechnique*, Vol. 24, No. 4, pp. 671–674.
19. Rayhani, M. H., & El Naggat, M. H. (2008). Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil. *International Journal of Geomechanics*, 8(6), 336–346.
20. Bishop, A. W., & Morgenstern, N. (1960). Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, 10(4), 129–153.

# Impacts of ionic concentration on the plasticity of clay and its implications on the slope stability of clay deposits

Joongi, Kim

Department of Civil and Environmental Engineering

Graduate School

University of Ulsan

## Abstract

Clay particles generally have a high specific surface area and negative surface charge, and the pore water and clay particles combine to form a double layer. Since the formation of the double layer water is basically by electrical attraction, the thickness of the clay particle double layer water is affected by the change in the ion concentration of the pore water. Since the change in the thickness of the double layer water the arrangement of the clay particles or the spacing between the clay particles, it affects various ground properties such as the volume, strength, stiffness, and plasticity of the clay ground. In this study, the liquid limit test was conducted from dielectric water to 2M in order to examine the change in plasticity according to the ion concentration of illite, kaolinite, and bentonite, which are representative clay minerals. In addition, in order to examine the effect of ionic valence on the liquid limit, NaCl and CaCl<sub>2</sub> were used to control the ion concentration. In addition, in order to examine the effect of ion concentration on the slope stability of the clay ground, the internal friction angle estimation equation using empirical equations was

applied to the slope stability analysis model, COMSOL Multiphysics to evaluate the slope stability according to the ion concentration. The shear strength reduction method was used for slope stability analysis.

As a result of the liquid limit test, the liquid limit of the sample showed a decreasing tendency as the ion concentration increased. Therefore of numerical analysis, the strength reduction factor (SRF) of the clay slope was found to increase as the ion concentration increased. Through the experimental results and numerical analysis results performed in this study, the effect of the change in ion concentration on the liquid limits and plastic limits of the clay and the stability of the slope including clay was shown, and it was used to evaluate the safety factor for the slope containing a lot of clay. It shows that the strength parameters according to the change of ion concentration should be considered.