

## 피압에 의한 점토 지반의 용탈 특성

### Leaching Characteristics on Clay Ground induced by Artesian Pressure

윤대호<sup>1</sup>, 김윤태<sup>2\*</sup>

Daeho Yun<sup>1</sup>, Yuntae Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Graduated student, Department of Ocean engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This paper performed consolidation tests on soft ground with and without artesian pressure conditions to find out characteristics of leaching effects using two types of one-dimensional column equipment (height : 1,100mm, outer diameter : 250mm). Artesian pressure of 5.5kPa was applied to the bottom of soft ground inside column equipment. Distribution of salinity and shear strength with soil depth were measured after the consolidation test. From the results, it was found that distribution of undrained shear strength and salt concentrations were similar at the top of clay ground irrespective of artesian pressure condition. However, at the bottom of clay ground, the values of undrained shear strength and salt concentration under artesian pressure were lower than those without artesian pressure. This result indicates that structure of soft soil with artesian pressure was weakened by salt leaching. Electronic resistance results showed that void ratio under artesian pressure condition was more reduced than that without artesian pressure condition.

#### 요 지

본 연구에서는 피압의 작용에 따른 점토 지반의 용탈 특성을 조사하기 위해 두 종류의 원통형 일차원 대형 컬럼 장치(높이 : 1,100mm, 직경 250mm)를 제작하여 점토 지반의 압밀 거동 실험을 수행하였다. 피압의 크기는 5.5kPa로 하부지반에서부터 작용하도록 하였으며, 압밀 실험 종료 후 점토층의 깊이에 따른 염분의 농도와 비배수 전단강도를 측정하였다. 실험 결과 비배수 전단강도 및 염분 분포는 점토층 하부에서 뚜렷한 차이를 보였으며, 상부로 갈수록 유사한 경향을 보였다. 이는 피압이 작용할 경우 점토층 내에 용탈현상이 발생하여 지반이 구조적으로 취약해져 나타난 결과로 판단된다. 또한 전기전도도 측정결과를 통해 시간에 따른 간극비 변화를 살펴본 결과, 피압이 작용하는 지반에서 간극비 변화가 더 크게 나타났다.

**Keywords** : Artesian pressure, Undrained shear strength, Soft ground, leaching effect, Electrical resistivity

### 1. 서 론

대한민국 남동단에 위치한 부산은 우리나라 제2의 도시이자, 제1의 무역항으로 급격한 경제 성장과 더불어 산업용지 및 주거 용지의 수요가 증가됨에 따라 부지의 확보를 위해 매립 또는 연약 지반의 개량이 요구되고 있다. 특히 부산 낙동강 하구 일원에

분포하고 있는 부산점토는 대심도 점토층으로 이루어진 우리나라의 대표적인 연약지반이다. 기존 연구자들이 수행한 지반 조사 결과에 따르면 부산 낙동강 하구 대심도 점토층 하부에 피압대수층이 존재하는 것으로 확인되었으며(Baek, 2002; Heo, 2003; Kim et al., 2002; Han and Yu, 1999; Kim et al., 2006), 이로 인해 하부 점토 지반 내에 용탈(leaching) 현상이 발생하여 다양한 지반공학적 문제가 유발될 수 있다. 용탈 현상이란 강우나 지하수 및 외부에서 유입되는 담수 등으로 인해 지반 내의 염분이 빠져나가는 현상으로, 용탈 현상이 발생할 경우 양이온 방출로 인해 점토 입자간의 화학적 구조가 취약해져 비배수전단강도, 압밀 침하,

Received 7 Nov. 2016, Revised 25 Dec. 2016, Accepted 25 Dec. 2016

\*Corresponding author

Tel: +82-51-629-6587; Fax: +82-51-629-6590

E-mail address: yuntkim@pknu.ac.kr (Y. Kim)

투수계수, 민감도 등에 영향을 미치는 요인이 된다(Bjerrum, 1967; Torrance, 1974; Woo et al., 1977; Ohtsubo et al., 1996; Nagase et al., 2006; He et al., 2014).

Fig. 1은 부산낙동강 하구 지역의 지층 단면(Fig. 1(a))과 깊이 따른 각 지역별 염분 변화(Fig. 1(b))를 나타낸다. 각 지층 구조 및 염분 변화는 기존 지반조사 연구 결과를 토대로 작성하였다(Chung et al., 2002; Chung et al., 2012; Heo, 2003; Ryu, 2003; Ryu et al., 2011). Fig. 1에 나타난 바와 같이 지역에 따라 염분 분포는 서로 차이이며, 동일한 지역에서도 깊이에 따라 분포 경향이 변한다는 것을 알 수 있다. Heo(2003)는 부산신항만(Busan new port 1~3) 지역의 퇴적물로부터 간극수를 추출하여 깊이에 따른 수소이온농도(pH) 및 염분(salinity)을 측정하고 하부 점토층의 염분이 상부 점토층에 비해 상대적으로 작은 값을 가진다고 보고하였다. Ryu(2003)와 Ryu et

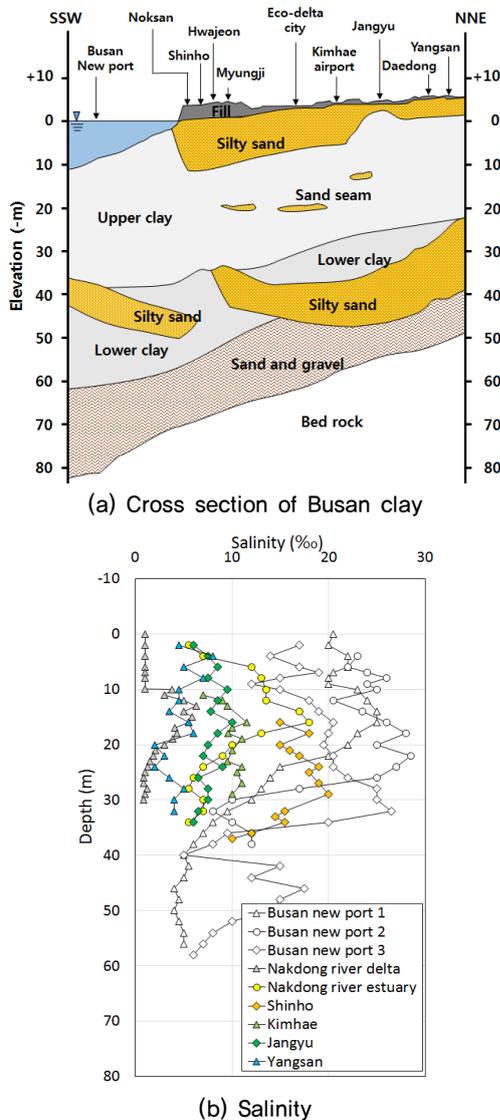


Fig. 1. Cross section and salinity of Busan clay

al.(2011)은 낙동강 하구(Nakdong river estuary) 및 삼각주 북부 지역(Nakdong river delta)의 지질 조사 결과 퇴적층의 상부와 하부에서 뚜렷한 염분 값의 차이를 보인다고 밝힌 바 있다. 또한 Chung et al.(2002)는 낙동강 하구 주변에 위치한 신호(Shinho), 김해(Kimhae), 장유(Jangyu) 및 양산(Yangsan) 지역의 깊이에 따른 염분 분포를 측정하였으며, 그 결과 대부분의 지역에서 깊이가 깊어짐에 따라 염분이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 하부 모래 및 자갈층에 작용하는 피압(artesian pressure)에 기인한다.

Bjerrum(1967)은 노르웨이 남부에 위치한 드람멘 점토(Drammen clay)의 용탈에 따른 전단강도 변화를 살펴본 결과 용탈 현상이 발생한 지반에서는 비배수 전단강도가 감소하고 압축성이 증가하여 침하가 크게 발생하게 된다는 연구 결과를 보고하였다. 또한 Fig. 2는 부산 낙동강 하구 부근에 위치한 화전 지역 점토의 용탈 현상에 따른 지반 물성치 변화를 나타낸 것으로서 점토층에 용탈 현상이 발생할 경우 점토의 간극비(void ratio,  $e$ )와 투수계수(permeability,  $k$ )는 감소하고 압축지수

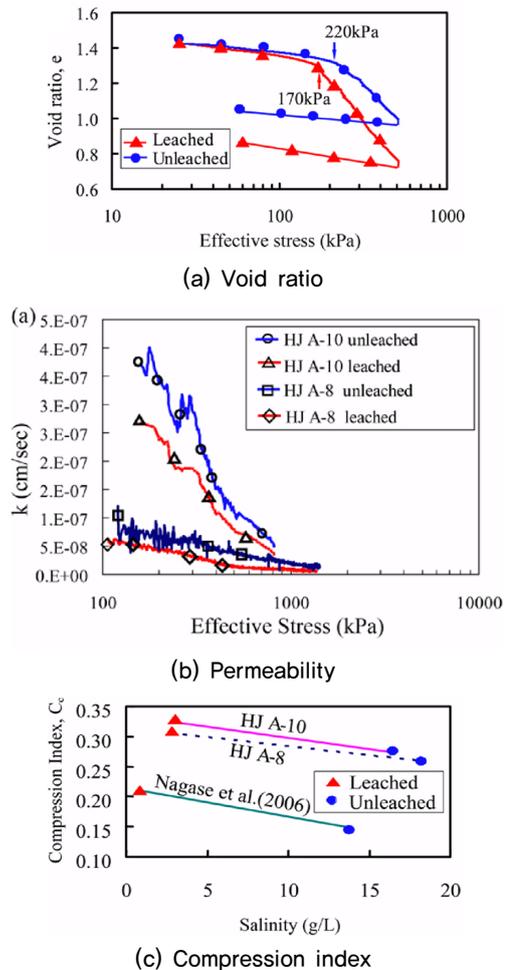


Fig. 2. Variation of compressibility with salinity (Kim and Do, 2010)

(compression index, CC)는 증가한다(Kim and Do, 2010).

피압대수층 위에 존재하는 점토층에 상향 침투로 인해 용탈(leaching) 현상이 발생할 경우 부등침하와 같은 지반공학적 문제가 야기될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 피압의 작용 유·무에 따른 점토 지반의 용탈 현상과 비배수 전단강도 특성 및 간극비 변화를 측정하였다. 실내실험은 수두차를 이용하여 상향 흐름을 제어할 수 있는 높이 1,500mm, 내부 직경 230mm(외부 직경 250mm)의 원통형 대형 압밀 장비를 제작하여 수행하였다. 이를 통해 피압의 작용 유·무에 따른 압밀 실험을 수행하여 점토층의 깊이 에 따른 염분의 용탈 현상을 측정하고 현장 베인 시험기를 이용하여 깊이 에 따른 비배수 전단강도를 각각 측정하였

다. 또한 점토층 지반의 상부에 전기전도도 측정 센서를 설치하여 압밀에 따른 간극비 변화를 측정하여, 피압의 작용이 점토층에 미치는 영향에 대해 비교·분석을 실시하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 실험 재료

연구대상 지역은 낙동강 하구에 위치한 ○○현장의 일원으로서 현장 지반조사를 통해 구한 지층 구조와 함수비 분포는 Fig. 3과 같다. 현장 지층 분포는 하부에 자갈 및 모래층과 중간에 대심도의 점토층이 깊게 분포하고 있으며, 상부에 퇴적 모래층이 존재하고 있다. 본 연구에서는 시추공을 이용하여 현장 점토를 채취하였으며, 함수비 분포를 측정한 결과 약 30~65% 내외로 나타났다. 실내실험을 통해 구한 점토층의 기본물성치는 Table 1과 같다. 비중은 약 2.69로 나타났으며, 통일분류법(USCS)으로 분류한 결과 고소성 점토(CH)로 나타났다. 본 연구에서는 연약지반의 조성 과 더불어 시료의 균질성을 가 지도록 10체(2.0mm)로 체가름을 하여 자갈, 조개 등의 불순물을 제거하였으며, 대형 수조에 담수를 이용하여 시료의 함수비를 80%로 재성형한 뒤 약 10일간 예압밀 후 실내 실험을 수행하였다.

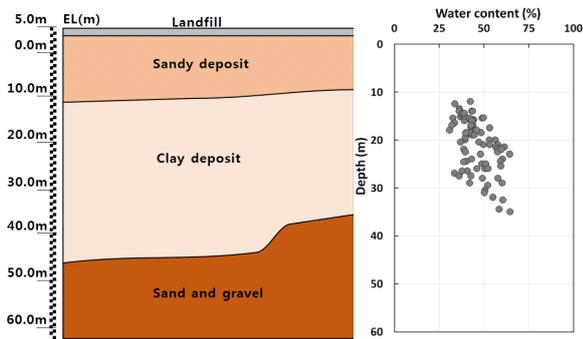


Fig. 3. Field investigation

Table 1. Geotechnical properties of clay

Initial water content (%)	Specific Gravity	Atterberg Limit			Passing #200 sieve (%)	USCS
		LL (%)	PL (%)	PI (%)		
30.92~64.79	2.69	51.52	26.11	25.41	97.2	CH

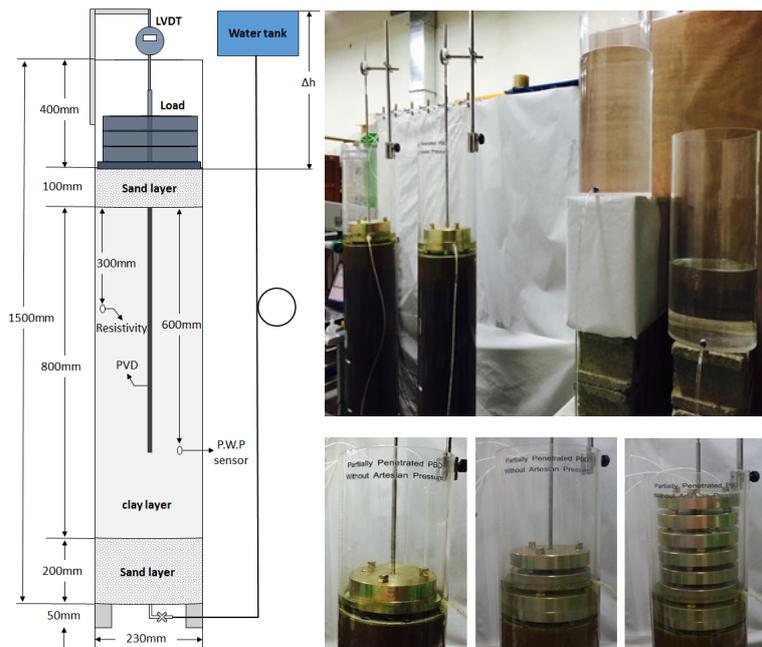


Fig. 4. 1-dimensional column test

## 2.2 실험 방법

피압의 작용에 따른 점토지반의 용탈 특성을 알아보기 위해 대형 압밀 실험 장비를 제작하여 실험을 수행하였다. 대형 압밀 실험 장비의 제원은 내부 직경 230mm(외부 직경 250mm), 높이 1,500mm이며, 원통형 아크릴로 제작되었다. 컬럼 하부에 상부 수조(water tank)를 연결하여 동수경사에 의한 상향 흐름이 가능하도록 제작하였다(Fig. 4). 지반은 하부 모래층(두께 : 200 mm), 중간 점토층(두께 : 800mm), 상부 모래층(두께 : 100mm)으로 구성되어 실제 지층 구조와 유사하도록 지반을 조성하였다. 점토층 상부에서 약 300mm 아래에 전기전도도 센서(resistivity)를 설치하여 전기비저항을 통한 상부 점토층의 간극율 변화를 측정하였다.

압밀 과정에서 유발되는 침하량은 LVDT를 이용하여 측정하였다. 전기전도도 센서 및 LVDT를 설치한 후 피압이 지반에 미치는 영향을 알아보기 위해 동수경사를 0.5로 하여 5.5kPa의 피압이 점토 하부에 작용하도록 하였다. 이때 동수경사는 시료가 조성된 컬럼의 상부에 높이 조절이 가능한 상부 수조(water tank)를 이용하여 컬럼의 바닥부분으로 상향침투가 작용하도록 하였다.

압밀을 촉진하기 위해 점토층에 연직배수재(prefabricated vertical drain, PVD)를 설치하였다. 이때 연직배수재의 타설 깊이는 점토층 전체 깊이의 3/4 지점까지 관입하였는데, 이는 연직배수재를 완전 관통할 경우 발생할 수 있는 피압의 초기 유출

을 방지하고자 하기 위함이다. 지반에 작용하는 하중은 총 3단계로서 1단계 4.91kPa, 2단계 9.82kPa, 3단계 19.64kPa이며 무게추를 이용하여 각각의 하중을 재하하였다. 각 하중 재하 기간은 1단계와 2단계에서는 8일, 3단계에서는 16일이며 총 32일 동안 압밀을 수행하였다. 또한 압밀 실험 완료시까지 수두가 일정하게 유지되도록 하여 지반 내에 피압이 소산되지 않고 지속적으로 작용할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 피압의 작용 유·무에 따른 실험의 오차를 최소화하고자 각 조건 별로 실험 장비를 제작하였다. 먼저 피압이 작용하지 않는 지반의 경우 상부 수조(water tank)와 조성된 점토층의 높이가 같도록하여 상향침투가 발생하지 않도록 하였으며, 피압이 작용하는 지반의 경우 상부 수조의 높이를 조절하여 동수경사에 의한 상향침투가 발생하도록 하였다. 이때 모든 센서 및 계측은 동시에 진행하였다.

## 3. 실험 결과

### 3.1 염분

Fig. 5는 압밀 실험이 끝난 점토층의 피압의 작용 유·무에 따른 염분 분포를 나타낸 것이다. 이때 각 조건에 따라 정확한 염분 값의 범위를 알기 위해 점토층 깊이별로 3회씩 측정하였다. 실험 전 측정된 점토층의 초기 염분 값은 약 4.5%로서, 이는 Ryu et al.(2011) 등이 조사한 낙동강 삼각주 부근 점토층의 염분 분포인 0.38~6.36%의 범위 내에 있다. 염분의 측정은 각각 깊이별 샘플을 채취한 뒤 염분측정기(오차 범위  $\pm 10\%$ )를 이용하여 측정하였으며, 이때 측정시마다 염분측정기를 세척하여 오차를 저감하고자 하였다.

먼저 피압이 작용하지 않는 점토층(soil without artesian pressure)에서 염분을 측정된 결과, 연직배수재가 설치된 상부 표면에 가까울수록 염분이 점차 감소하는 경향을 보였다. 또한 배수재가 관입되지 않은 하부 점토층의 경우 약 4.14%로 초기 염분 값과 큰 차이를 보이지 않았다. 반면 피압이 작용하는 점토층의 경우(soil with artesian pressure) 염분 값이 피압이 작용하지 않는 지반에 비해 상대적으로 크게 감소하는 경향을 보였으며, 점토층 깊이가 깊어짐에 따라 염분이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 피압에 의한 담수의 상향 침투로 인해 하부 점토층에서 용탈 현상이 발생하여 염분이 크게 감소한 것으로 판단된다. 특히 피압이 작용하는 점토층에서 배수재가 관입되지 않은 하부 점토층의 염분 측정 값은 평균 약 2.86%로서 피압이 작용하지 않는 점토층과 약 1.25%의 차이를 보였다.

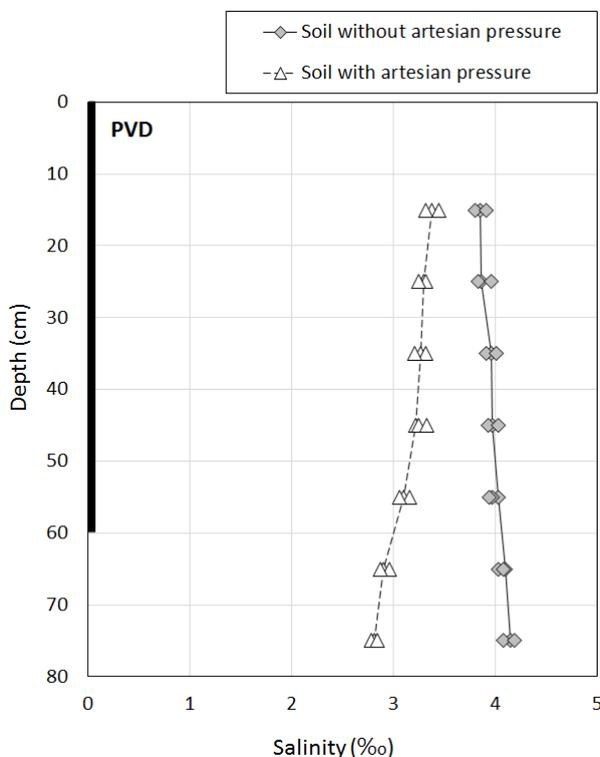


Fig. 5. Salinity with depth

Fig. 6은 압밀 하중 재하시 사용된 무게추를 나타낸다. 각각 실험 종료 후 사용된 무게추를 실험 전의 무게추(Fig. 6(a))와 비교한 결과 피압이 작용하지 않은 지반(without AP)에 사용된 무게추의 경우 표면이 매끈한 반면(Fig. 6(b)), 피압이 작용한 지반(with AP)에 사용된 무게추의 경우 무게추의 표면에 백색의 이물질이 부착되어 있는 것이 육안으로 확인되었다(Fig. 6(c)). 이



(a) Initial



(b) After consolidation(without AP)



(c) After consolidation(with AP)

Fig. 6. Load plate for consolidation test

러한 현상을 분석하기 위해 피압이 작용한 지반에 사용된 무게추(weight plate)의 표면 이물질 및 각 피압 조건에 따른 하부 점토층(dredged soil)의 일부를 채취하여 X-선 형광분석기(X-ray fluorescence spectrometry, XRF)를 통해 성분 분석을 수행하였다.

Table 2는 피압 조건에 따른 하부 점토층과 사용된 무게추 표면의 XRF 분석 결과를 나타낸다. 피압의 작용 유·무에 따른 XRF 분석 결과, 하부 점토층의 경우 규소(Si)와 알루미늄(Al)이 주요 성분으로 나타났으며 두 지반에서 대부분 유사한 값을 나타내었다. 반면 소금을 구성하는 성분인 염소(Cl)의 경우 피압이 작용한 지반에서 0.991, 피압이 작용하지 않는 지반에서 1.592로 나타났으며, 상기 나열된 다른 성분에 비해 비교적 큰 차이를 나타내었다. 또한 피압이 작용하는 지반에서 사용된 무게추의 분석 결과를 살펴보면 염소(Cl)의 함유량이 약 9.65%로서 많은 양의 염소가 무게추 표면에 부착되어 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 통해 피압수의 상향 침투로 하부지반에 용탈현상이 발생한 것을 알 수 있다. 염분의 용탈이 발생하면 지반의 압축성이 커질 수 있으며 상부 구조물에 부식이 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

### 3.2 비배수 전단강도

Fig. 7은 현장 베인 시험기(field vane tester)를 이용하여 측정된 점토층의 깊이별 비배수 전단강도 분포도를 나타낸다. 컬럼 시험 장치 및 압밀에 의한 연직배수재의 굴곡 등을 고려하여 직경 25.4mm, 높이 50.8mm의 베인(vane)을 사용하였다. 피압의 작용 유·무에 따라 동일한 점토층 깊이에서 각각 총 6회씩 수행하였으며, 압밀침하 깊이를 고려하여 약 200mm 이하에서 비배수 전단강도를 측정하였다. 압밀시험 전의 점토는 함수비 80%로 재성형된 슬러리 상태의 시료이므로 초기 비배수 전단강도는 매우 작다고 사료된다.

Table 2. XRF results of clay and load plate

Type	Clay		Type	Load plate (%)
	without AP (%)	with AP (%)		
Si	53,007	53,091	Zn	80,150
Al	12,441	13,035	Cl	9,650
Fe	9,821	9,682	Mg	3,939
Ca	7,900	7,811	Si	2,404
K	7,421	7,660	Ca	1,187
Mg	2,502	2,591	Al	0,804
Na	2,137	1,931	K	0,513
Cl	1,592	0,991	P	0,229

실험 결과를 살펴보면 먼저 상부 점토층의 경우 비배수 전단강도 값의 범위는 피압의 작용 유·무에 관계없이 유사하게 나타났다. 이는 점토층 상부에 포설된 모래층 및 점토 지반에 관입된 연직배수재를 통해 점토층에서 배수가 원활하게 이루어져 피압에 관계없이 비배수 전단강도 값이 유사하게 증가된 것으로 판단된다. 반면 점토층 하부로 갈수록 피압이 작용하는 지반의 비배수 전단강도가 상대적으로 더 작게 증가하는 경향을 보였다. 특히 연직배수재가 미관통된 하부 점토층의 경우 그 값의 차이가 크게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 결과는 앞서 나타난 점토층의 깊이별 염분 분포와 유사하며 하부 점토층의 경우 피압수에 의해 점토 지반 내에 용탈 현상이 발생하여 점토 입자의 이중층(double)이 팽창되어 마찰특성이 감소하고 점토 입자간의 화학적 결합 구조가 취약해졌을 뿐만 아니라 상향 침투에 의해서 유효응력 증가가 작게 발생되어 비배수 전단강도 값이 작게 나타났다고 판단된다.

### 3.3 간극비

본 연구에서 수행한 점토층의 간극비는 흙의 전기전도도와 간극수의 전도도의 비인 formation factor와 컬럼 실험을 통해 측정한 시료의 전기저항(R) 및 전기비저항( $\Omega$ )과의 관계를 통해 산정하였으며, 이러한 관계를 통해 점토층의 시간에 따른 간극을 변화 곡선을 유도할 수 있다. Formation factor는 전류가 흐르는 방향과 흙 입자의 배열 방향이 평행하다는 전제 하에 간극수의 전도도 및 흙의 간극율과 비틀림의 항으로 유도하여 나타낸 것으로 식 (1)과 같다(Archie, 1942).

$$F(\text{formation factor}) = \sigma_w / \sigma_{\text{mix}} = T^2 / n = n^{-m} \quad (1)$$

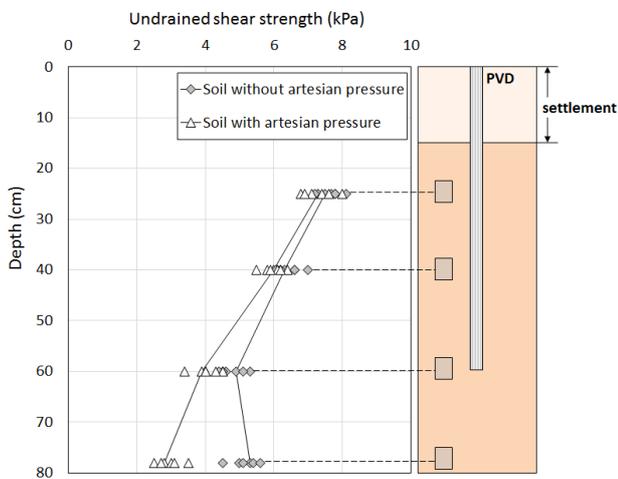


Fig. 7. Undrained shear strength with respect to artesian pressure

여기서,  $\sigma_w$ 는 간극수의 전도도,  $\sigma_{\text{mix}}$ 는 흙의 전기전도도, T는 비틀림, n은 간극율, m은 Archie's m을 나타낸다.

Salem and Chilingarian(1999) 의하면 m은 흙 입자의 형상, 입경, 흙의 종류에 의해 영향을 받으며, m은 사질토에서는 일반적으로 1.3에서 1.6의 값을 가지고(Archie, 1942; Jackson et al., 1978), 카올리나이트(kaolinite)는 1.8, 일라이트(illite)의 경우 2.11, 몬모릴로나이트(montmorillonite)의 경우 3.0 이상의 값을 가진다고 알려져 있다(Campanella and Weemes, 1990; Jackson, et al., 1978; Salem and Chilingarian, 1999). 실험 결과 본 연구에서 사용된 점토의 archie's m은 약 2.6으로 선행연구를 통해 조사된 점토의 범위와 유사하게 나타났다.

전기저항은 시료의 측정에 사용되는 전극의 형상, 크기, 재질 등에 영향을 받을 뿐만 아니라 전극과 연결된 전선의 길이, 재질 등에 의해서도 영향을 받기 때문에 고유의 특성을 반영하기 어려운 문제가 있다. 따라서 전극에서 측정된 전기저항 값을 전기비저항 값으로 변환하기 위한 교정을 실시하였다. NaCl (순도: 99.9%)을 이용하여 증류수의 전기전도도를 3 S/m까지 증가시키며 LCR meter(Agilent 4236B)를 사용해 전기저항을 측정하고 동시에 conductivity meter(Accumet Excel XL50, Fisher Scientific)를 사용하여 각 시료의 전기전도도를 측정하였다. Fig. 8은 측정된 전기저항과 전기비저항( $\lambda=1/\sigma=1/\text{전기전도도}$ )의 관계를 보여준다. 측정된 전기저항은 전기비저항과 선형의 관계를 보이며, 전기저항과 전기비저항과의 교정계수( $\alpha$ )는 피압이 작용하지 않는 지반에서 0.02501m, 피압이 작용하는 지반에서 0.02252m의 값을 보였다. 각 교정계수 값을 이용하여 측정된 전기저항 값을 전기비저항 값으로 변환하여 식 (1)을 통해 시간에 따른 간극비 변화를 산정하였다.

Fig. 9는 전기비저항 실험을 통해 구한 점토층의 시간-간극비

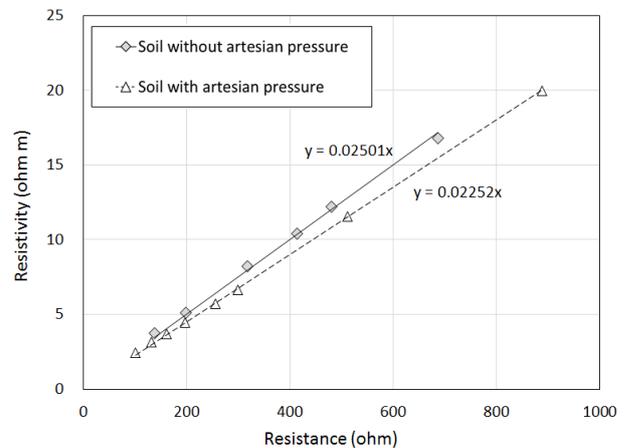


Fig. 8. Relationship between the resistivity and resistance

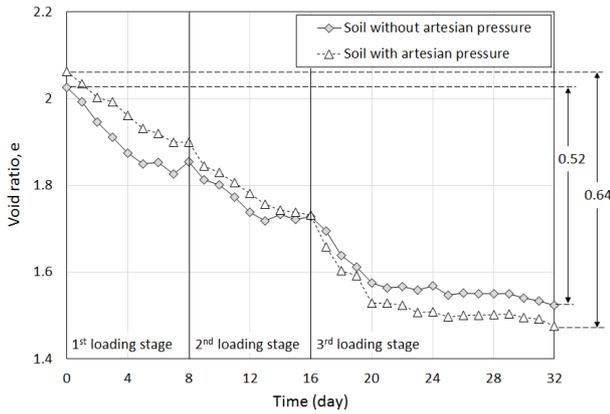


Fig. 9. Time - void ratio curve

관계 곡선을 나타낸다. 각 조건에 따른 간극비 변화량을 살펴보면 각각 피압이 작용하지 않는 지반의 경우 약 0.52, 피압이 작용하는 지반의 경우 약 0.64로 피압이 작용하는 지반에서 더 큰 간극비의 변화량을 보였다. 이와 같은 연구 결과는 염분 용탈이 발생한 지반에서 침하나 압축성이 커진다는 기존 연구결과와 일치한다. 시간-간극비 관계 곡선에서 하중이 재하되는 순간에 간극비 변화량이 소폭 증가하는 경향을 보였는데 이는 흡과 간극수의 전기비저항을 통해 간극비를 측정하는 실험 특성 상 하중이 재하됨에 따라 발생하는 실험적 오차로 판단된다. 전기비저항의 경우 간극수의 농도에 영향을 많이 받게 되며 본 연구에서는 피압을 지속적으로 가해 지반내의 염분이 일정하게 유지되지 않으므로 결과값의 정확한 검증을 위해 추후 더 많은 실험 및 분석이 필요하다. 또한 실내실험 특성상 피압의 크기가 지반 조건에 비해 상당히 크므로 본 연구의 결과로 일반화하기에는 한계가 있다. 추후 피압의 크기를 다양화하여 이에 따른 지반 거동 및 영향에 대한 추가적인 실험 및 분석을 진행할 필요가 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 피압에 의해 점토지반에서 발생하는 용탈 현상이 지반에 미치는 영향을 알아보기 위해 상향침투 제어가 가능한 원통형 대형 압밀 장비를 제작하였다. 이를 이용하여 피압의 작용 유·무에 따른 점토층의 염분 변화, 비배수 전단강도의 변화 및 간극비 변화 등을 살펴보았으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 점토층의 깊이에 따른 염분 분포를 측정하는 결과 피압의 작용 유·무에 따라 그 값이 뚜렷한 차이를 나타내었다. 특히 배수재가 미관통된 하부 점토층의 염분 농도는 피압이 작용하지 않는 지반에서 약 4.14%, 피압이 작용하는 지반에서 약

2.86%이며 약 1.25%의 차이를 나타내었다. 또한 XRF 분석을 통해 하부 점토층 및 무게추의 성분을 분석한 결과 피압이 작용한 지반의 염분이 피압이 작용하지 않은 지반에 비해 상대적으로 낮은 값을 나타내는 경향을 보였으며, 하중 재하를 위해 사용된 무게추에서 다량의 염소(Cl)가 검출되었다. 이러한 결과를 통해 점토층에 피압이 작용할 경우 담수의 상향침투로 인해 점토층의 용탈 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

- (2) 피압의 작용 유·무에 따른 비배수 전단강도를 각각 측정하는 결과 상부에서부터 심도가 깊어짐에 따라 비배수 전단강도 값의 차이가 점차 증가하는 경향을 보였다. 특히 점토층 바닥 부분의 경우 그 값의 차이가 크게 나타났는데 이는 용탈 현상으로 인해 점토 입자간의 화학적 결합이 취약해졌을 뿐만 아니라 상향 침투에 의해 유효응력의 증가가 작게 발생되어 나타난 것으로 판단된다.
- (3) 간극비는 하중 단계 및 시간에 따라 점차 감소하는 거동을 보였으며, 피압이 작용한 지반에서 더 큰 간극비 변화량을 보였다.

#### Acknowledgement

This work was supported by a Research Grant of Pukyong National University(2016 year) and the Brain Korea 21 Plus(BK 21 Plus).

#### References

1. Archie, G. E. (1942), The electrical resistance log as an aid in determining some reservoir characteristics, Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Vol.146, No.1, pp.54-62.
2. Baek, S. H. (2002), Characterisation and Geotechnical Properties of Pusan Clays by Insitu Tests, PhD's thesis, pp.1-165(in Korean).
3. Bjerrum, L. (1967), Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, Geotechnique, Vol.17, No.2, pp.83-118.
4. Campanella, R. and Weemees, I. (1990), Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies, Canadian Geotechnical Journal, Vol.27, No.5, pp.557-567.
5. Chung, S. G., Giao, P. H., Nagaraj, T. S. and Kwag, J. M. (2002), Characterization of Estuarine Marine Clays for Coastal Reclamation in Pusan, Korea, Marine Georesources and Geotechnology, Vol.20, No.4, pp.237-254.
6. Han, Y. C. and Yu, G. Y. (1999), A Study of Artesian Characteristics

- in Yangsan/Mulgeum Site, KGS Fall '99 National Conference, pp.123-130 (in Korean).
7. He, P., Ohtsubo, M., Abe, H., Higashi, T. and Kanayama, M. (2014), Quick Clay Development and Cation Composition of Pore Water in Marine Sediments from the Ariake Bay Area, Japan, *International Journal of Geosciences*, Vol.5, No.6, pp.595-606.
  8. Heo, D. Y. (2003), A Study on the Depositional Environment and Geotechnical Properties of Clay Deposited at the Busan New Port Site, Dong-A University, PhD's thesis, pp.8-198 (in Korean).
  9. Jackson, P., Smith, D. T. and Stanford, P. (1978), Resistivityporosity-particle shape relationships for marine sands, *Geophysics*, Vol.43, No.6, pp.1250-1268.
  10. Kim, H. T., Cho, J. H., Yoo, J. Y., Ro, J. K. and Kim, S. W. (2002), Self-Weight Consolidation Settlement of Soft-Grounds on the Artesian Pressure After the Penetration of Vertical Drain, KGS Fall '02 National Conference, pp.597-604 (in Korean).
  11. Kim, T. H., Yu, J. M., Lee, M. J., Bae, K. H. and Jung, D. S. (2006), A Design Case Study Considering the Artesian Pressure in Hwa Jeon Site of Nakdong Delta Area, Korean Association of Professional Engineers Soil Mechanics & Foundation Engineering, pp.311-319 (in Korean).
  12. Kim, Y. T. and Do, T. H. (2010), Effect of Leaching on the Compressibility of Busan Clay, *Journal of Civil Engineering*, Vol.14, No.4, pp.291-297.
  13. Nagase H., Shimizu K., Hiro-oka A., Tanoue Y. and Saitoh Y. (2006), Earthquake-induced residual deformation of Ariake clay deposits with leaching, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 26, pp.209-220.
  14. Ohtsubo, M., Egashira, K. and Takayama, M. (1996), Mineralogy and Chemistry, and Their Correlations with the Geotechnical Properties of Marine Clays in Ariake Bay, Japan: Comparison of Quick and Nonquick Clay Sediments, *Journal of Marine Georesources & Geotechnology*, Vol.14, No.3, pp.263-282.
  15. Ryu, C. K. (2003), Engineering Geological Characteristics of the Holocene Marine Clayey Sediments in the Estuary of Nagdong River, Pusan University, Master's thesis, pp.1-230 (in Korean).
  16. Ryu, C. K., Kang, S. R., Chung, S. G. and Jeon, Y. M. (2011), Late Quaternary Depositional Environmental Change in the Northern Marginal Area of the Nakdong River Delta, *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol.47, No.3, pp.213-233 (in Korean).
  17. Salem, H. S. and Chilingarian, G. V. (1999), The cementation factor of Archie's equation for shaly sandstone reservoirs, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol.23, No.2, pp.83-93.
  18. Torrance, K. J. (1974), A laboratory Investigation of the Effect of Leaching on the Compressibility and Shear Strength of Norwegian Marine Clays, *Norwegian Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.155-173.
  19. Woo, S. M., Moh, Z. C. and Burmungsup, T. (1977), Effects of Soil Structure on Compressibility of an Artificially Sedimented Clay, *Proceeding of International Symposium on Soft Clay*, pp. 311-325.