

연직배수재가 부분 관입된 점토지반의 피압에 따른 압밀 거동에 관한 연구

A Study of Consolidation Behavior of Clay Ground with Partially Penetrated PVD under Artesian Pressure

윤대호¹, Nguyen Ba Phu², 김재홍³, 김윤택^{4*}

Daeho Yun¹, Nguyen Ba Phu², Jaehong Kim³, Yuntae Kim^{4*}

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

²Graduated student, Department of Ocean engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

³Senior researcher, Infrastructure research center, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Republic of Korea

⁴Member, Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

ABSTRACT

Many researchers reported that artesian pressure exists in thick soft ground of Busan Nakdong river estuary. Artesian pressure in soft ground could affect rate of consolidation, settlement and drainage capacity of prefabricated vertical drain(PVD). This paper investigated consolidation behaviors of soft ground with partially penetrated PVD subjected to artesian pressure. Laboratory tests with 1-dimensional large column equipment and their numerical analyses were carried out. Test results showed that the consolidation settlement of clay ground with artesian pressure was higher than that without artesian pressure. Due to artesian pressure, the dissipation rate of excess pore water pressure was reduced in soft ground with artesian pressure, especially at bottom part of clay ground. Numerical results were in good agreement with experimental test results.

요 지

부산 낙동강 하구 대심도 연약지반 아래에 피압대수층이 존재한다는 것이 많은 연구자들에 의해 관측되었다. 연약지반에 작용하는 피압은 압밀 속도, 압밀 침하량, 연직배수재의 성능 등에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 피압의 작용 유무에 따른 연직배수재가 부분 관입된 점토지반의 압밀 거동을 분석하였다. 연구를 수행하기 위해 일차원 대형 컬럼 장비를 이용한 실내실험과 유한요소 해석을 실시하였다. 실험 결과 피압이 작용하는 점토지반의 압밀 침하가 피압이 작용하지 않는 점토지반보다 더 크게 나타났으며, 과잉간극수압의 소산 속도는 더디게 나타났다. 또한 동일한 지반 조건을 이용하여 유한요소 해석을 수행한 결과 실내 실험과 유사한 경향을 나타내었다.

Keywords : Consolidation, Artesian pressure, Vertical drain, Clay ground

1. 서 론

일반적으로 강어귀, 해안, 삼각주 및 델타지역 등의 경우 표층 아래 점토층이 주를 이루는 연약지반인 경우가 많아 건설 시공시 연약지반의 개량이 필수적이다. 특히 부산

낙동강 하구 지역은 우리나라의 대표적인 대심도 연약지반으로서 건설 시공시 지반조사와 더불어 지반개량이 필수적인 지역이다. 이에 다양한 연구자들이 부산 낙동강 하구 지역에 대해 지반조사 및 연구를 수행하였으며, 그 결과 대심도 연약지반 아래 사질토층이 존재하고 이곳에 피압대수층이 존재하는 지역이 관측되었다고 밝힌 바 있다 (Han and Yu, 1999; Kim et al., 1999; Baek, 2002; Kim et al., 2002; Heo, 2003; Kim et al., 2006). 피압대수층이란 대심도 연약지반 아래 모래 혹은 자갈 대수층이 점토층

Received 19 Jan. 2016, Revised 22 Mar. 2016, Accepted 23 Mar. 2016

*Corresponding author

Tel: +82-51-629-6587; Fax: None

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

Table 1. Survey of artesian pressure near Nakdong river estuary

Location	Pressure head (m)	Reference
Yongsan	2.25~2.90	Han & Yu (1999)
Busan Newport	2.96	Heo (2003)
Hwajeon	0.6~1.3	Kim et al. (2006)
Shinho	1.09	Baek (2002)
Jangyu	0.19	

과 같은 불투수층 또는 투수계수가 지극히 낮은 상부지반의 영향으로 수압의 유출 없이 압력을 지속적으로 받고 있는 피압이 존재하는 대수층을 말한다. Table 1은 선행연구를 통해 부산 낙동강 하구 부근의 피압 수두 관측 결과를 나타낸 것이다. 관측 지역별로 유출량의 차이를 두고 있으나 전반적으로 넓은 지역에 분포하고 있는 것으로 나타났다. Jang and Kim(2000), Kim et al.(1999), Choi(1999)은 피압 수압을 고려하여 점토층의 압밀 거동에 대해 유한요소를 수행하였으며 이를 통해 피압이 작용하는 지반에서 더 큰 침하가 발생한다는 해석 결과를 나타낸 바 있다. 또한 Kim and Do(2010)는 실내실험을 통해 부산점토(Busan clay)가 피압에 의해 용탈 현상(leaching effect)이 발생하여 점토의 압축지수(compression index, C_c)가 증가하고, 선행압밀하중(preconsolidation pressure)은 감소하며 투수계수(permeability)는 감소한다는 연구 결과를 제시하였다. 즉, 피압대수층이 존재하는 지역의 경우 피압으로 인해 압밀시간의 지연과 더불어 예측 침하량보다 더 큰 침하량이 유발될 수 있다. 따라서 다양한 지반공학적 문제를 야기시킬 수 있는 피압의 영향을 정량적으로 분석하기 위해 동일한 지반 조건에서 피압의 작용 여부에 따른 실내실험과 유한요소 해석을 통한 비교 및 검증이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 피압이 점토지반의 압밀 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 실내실험과 유한요소해석을 수행하였다. 부산 낙동강 하부 연약지반 상태를 원통형 대형 압밀 시험으로 모델링하기 위해 내부 직경 230mm(외부 직경 250mm), 높이 1,500mm의 상향 침투 제어가 가능한 대형 압밀시험 장치를 개발하여 연약점토 지반을 조성하였으며, 간극수압센서 및 다이얼 게이지를 설치하여 상재 하중에 따른 각각의 압밀 특성을 실시간으로 계측하였다. 실내실험시 정확한 경향을 파악하기 위해 모든 실험은 2번씩 반복적으로 수행하였다. 또한 실내실험 결과를 토대로 유한요소해석을 수행하여 피압 조건에 따른 각각의 실험결과에 대한 비교 및 분석을 수행하였다.

2. 실내실험

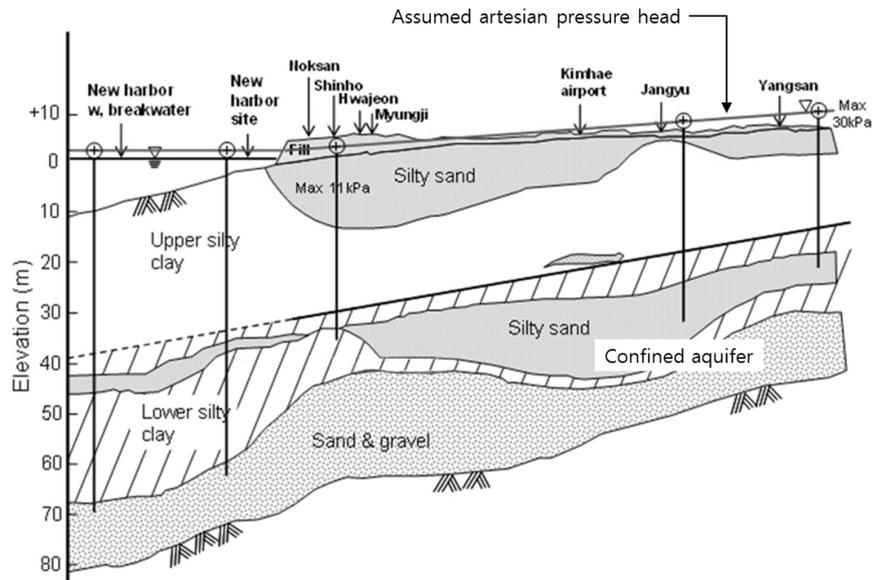
2.1 실험 재료

Fig. 1(a)는 낙동강 하구 지역의 대표적인 지층 구조 모식도를 나타내며, Fig. 1(b)는 낙동강 하구 에코델타시티 조성단지 지역의 현장 지반조사 결과로부터 구한 지층단면도를 나타낸다. 현장 지층 구조는 대심도 연약점토층을 기준으로 하부에는 자갈·모래층이 존재하며, 상부에는 0m~15m 두께의 퇴적 모래층이 존재한다. 점토층의 심도는 지표면을 기준으로 약 10m부터 시작하여 15m~40m의 분포를 가진다. 본 연구에서는 실제 현장 지반의 거동을 분석하기 위해 부산 낙동강 하구 에코델타시티 조성단지 지역의 현장 점토를 얇은 황동판을 이용하여 채취하였으며, 실험실에서 재성형하여 실험에 사용하였다.

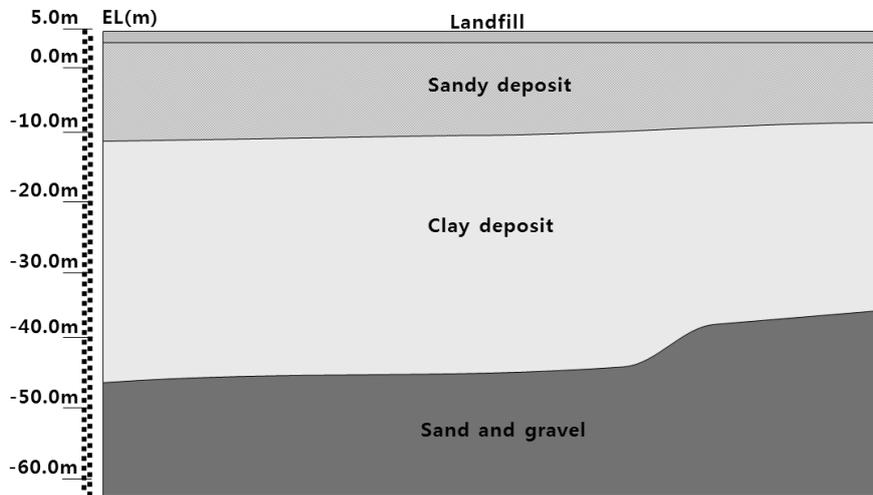
Fig. 2와 Table 2는 토층 깊이에 따른 점토층의 함수비 분포 및 기본물성실험 결과를 나타낸다. 함수비 분포는 깊이에 따라 약 30%~65% 내외를 보였다. 비중은 약 2.69의 값을 가졌으며, 통일분류법에 의한 분류 결과 소성점토(CH)로 나타났다. 이와 같은 결과는 기존 연구 결과와 유사한 범위를 나타낸다(Chung and Giao, 2001; Chung et al., 2002; Kim and Do, 2011; Chung et al., 2010). 또한 시료 채취 과정 중 나타난 패각 및 자갈 등과 같은 불순물에 의한 실험 결과의 오차 발생을 저감하기 위해 10번체(2.0mm)로 체가름을 하였으며, 연약지반의 조성과 시료의 균질성을 위해 함수비를 80%로 조정하여 실험을 수행하였다.

2.2 실험 장비 및 방법

Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구를 위해 제작한 1차원 대형 컬럼 장치의 개념도를 나타낸다. 피압의 존재에 따른 점토층의 압밀 거동을 알아보기 위해 상향 흐름의 제어가 가능



(a) Representative soil profile of delta deposit



(b) Field investigation (Korea water resources corporation, 2015)

Fig. 1. Soil profiles of delta deposit

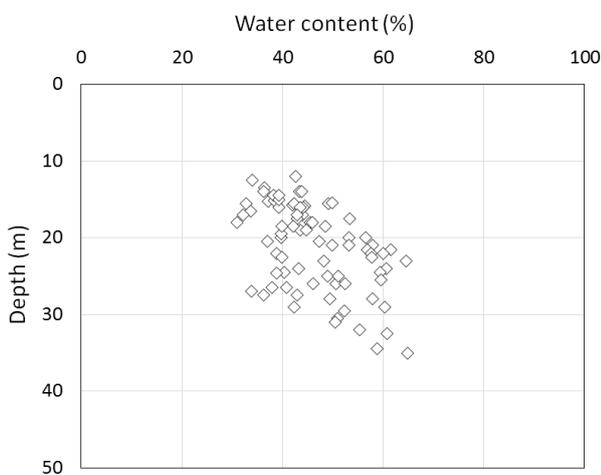
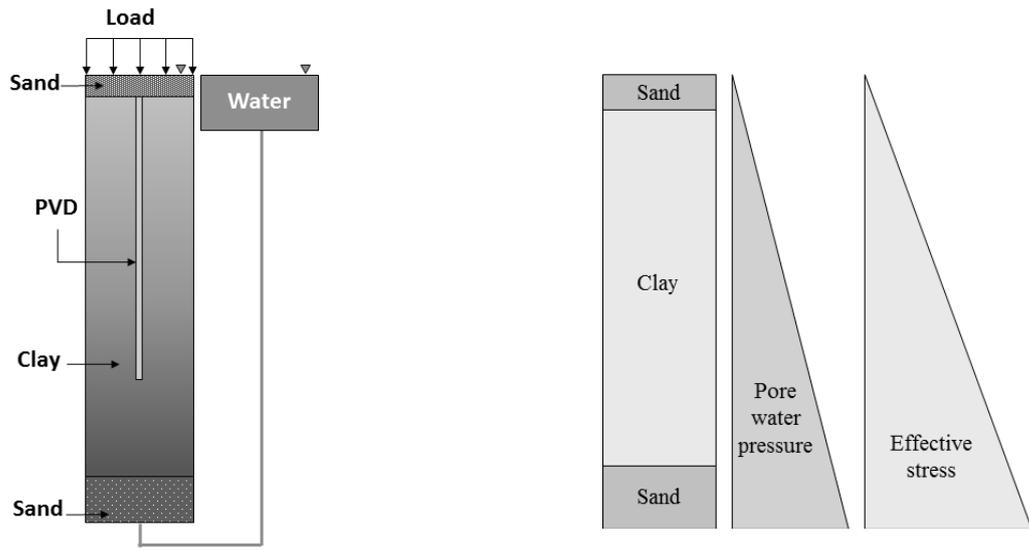


Fig. 2. Water content with depth

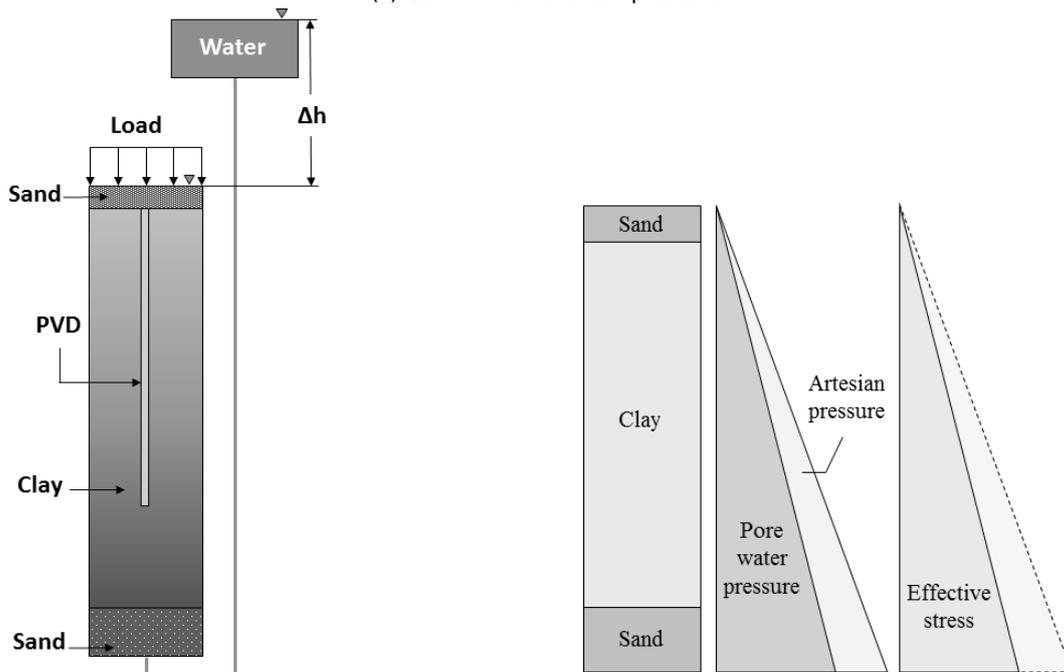
하도록 하였으며 두 개의 1차원 대형 컬럼 장치를 제작하여 피압의 작용 유·무에 따른 압밀 실험을 동시에 수행하였다. 장비의 제원은 높이 1500mm, 내부 직경 230mm(외부 직경 250mm)이며, 컬럼의 하부에는 대형 수조가 연결되어 있어 동수경사를 이용하여 피압을 작용할 수 있다. 본 연구에서는 동수경사를 0.5로 하여 약 5.5kPa의 피압이 작용하도록 하였다. 시료의 구성은 상부와 하부 모래층이 각각 100mm, 200mm이며, 중간에 점토층을 800mm로 하여 실제 현장의 지층 구조와 유사하게 조성하였다. 실험에 사용된 연직배수재는 폭 100mm, 두께 5mm의 하모니카형 연직배수재이며(Fig. 5), 피압수가 배수재를 통해 즉시 유출되지 않도록 점토층 내 600mm까지 부분관입으로 관

Table 2. Geotechnical properties of clay

Water content (%)		Specific Gravity	Atterberg Limit			USCS
Field	Laboratory		LL (%)	PL (%)	PI (%)	
30~65	80	2.69	51.52	26.11	25.41	CH



(a) Soil without artesian pressure



(b) Soil with artesian pressure

Fig. 3. 1-D Large column test

입하였다. 연직배수재 설치 후 상부 모래층을 포설하였으며, 모래 포설 과정 중 연직배수재 내부에 모래 등의 유입으로 인한 통수능의 저하가 발생하지 않도록 하였다. 압밀하중은 무게추를 이용하여 총 3단계(4.91kPa, 9.82kPa, 19.64kPa)로 가했으며, 각 단계의 침하량과 간극수압의 증

가 및 소산 변화량을 실시간으로 계측하였다. 간극수압계 (pore water pressure sensor)의 위치는 점토층 바닥면(점토층 상부에서 800mm), 연직배수재 관입 위치(점토층 상부에서 600mm) 및 연직배수재 관입 위치의 상부(점토층 상부에서 400mm)로서 각각 센서의 위치별로 200mm의

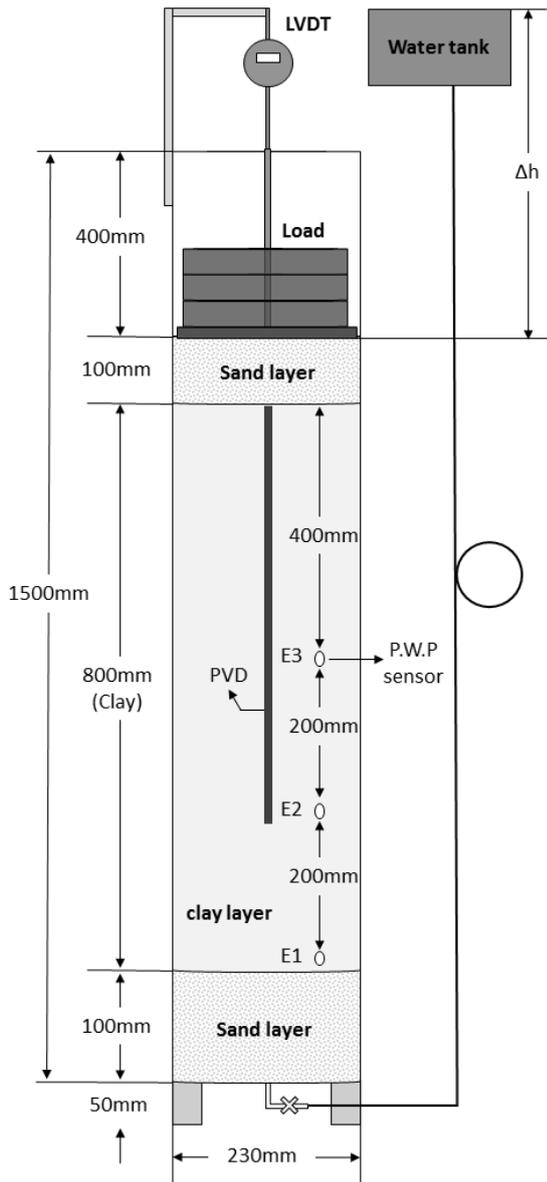


Fig. 4. Design of 1-dimensional column test

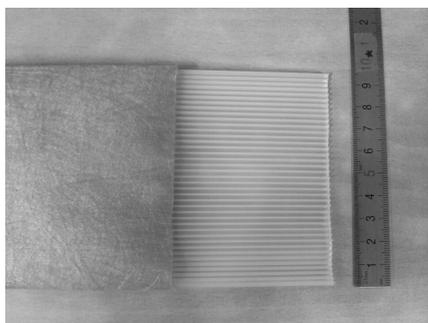
이격 거리를 두고 설치를 하였다. 동일하게 제작된 두 개의 1차원 대형 컬럼 장치에 동일한 함수비로 조성된 점토

시료를 이용하여 연약지반을 조성하였으며, 시료의 안정화를 위해 예비압밀을 14일 동안 수행하였다. 시료의 안정화는 지반 조성시 발생한 과잉간극수압이 소산되는 것을 나타낸다. 실험 수행시 1개의 대형 컬럼 장치에는 피압을 작용시키지 않았고, 다른 1개의 대형 컬럼 장치에는 피압을 작용시켜 동일한 조건으로 단계별 압밀시험을 수행하여 실험오차를 최소화하고 정확한 실험 결과를 얻고자 하였다. 1단계와 2단계의 하중 재하 기간은 각각 8일, 3단계에서는 16일 동안 실험을 수행하여 총 32일 동안 압밀을 한 후 실험을 종료하였다. 또한 실험의 정확한 경향을 파악하기 위해 모든 실험은 동일한 조건으로 각각 2회씩 수행하였다.

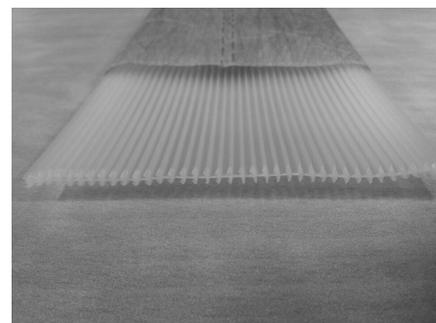
2.3 실험결과

2.3.1 침하

Fig. 6은 피압의 작용 유무에 따른 압밀 침하 측정 결과를 나타낸다. 각각의 실험 결과를 살펴보면 첫 번째 실험(1st test) 결과의 경우 피압이 작용하지 않는 지반(soil without artesian pressure)에서 약 132.97mm, 피압이 작용하는 지반(soil with artesian pressure)에서 약 145.08mm의 침하가 발생하였다. 두 번째 실험(2nd test) 결과의 경우 동일한 조건에서 각각 142.87mm, 155.98mm의 침하가 발생하였다. 두 번의 실험 결과 모두 피압이 작용하는 지반(soil with artesian pressure)에서 약 10% 가량 더 큰 침하가 발생하는 경향을 보였다. 동일한 실험 조건에서 약간의 결과 값의 차이를 보였는데 이는 시료의 비균질성과 재조성 등에 따른 실험적 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 피압이 작용하는 지반에서 침하량이 더 크게 유발된 이유는 피압에 의해 유효응력의 감소가 발생하고(Fig. 3 참고), 이로 인해 지반의 강성도가 감소하기 때문이다.



(a) Surface



(b) Side

Fig. 5. Pictures of PVD

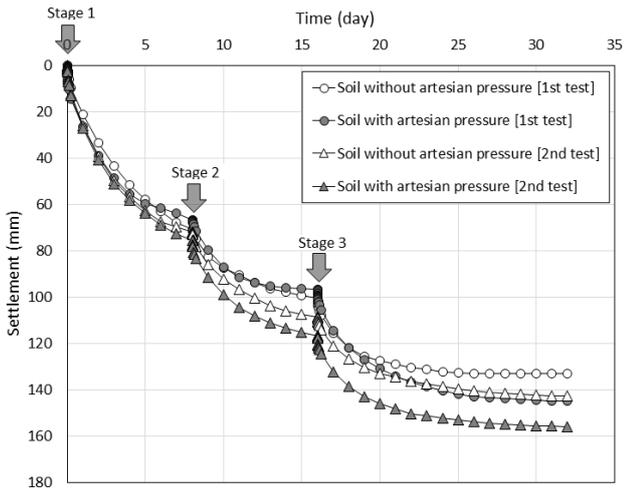
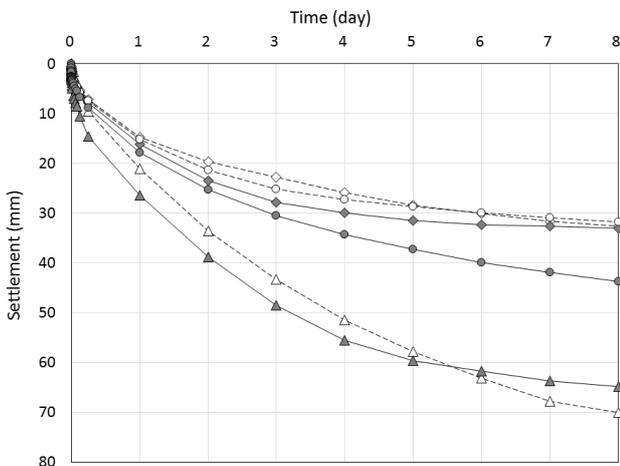
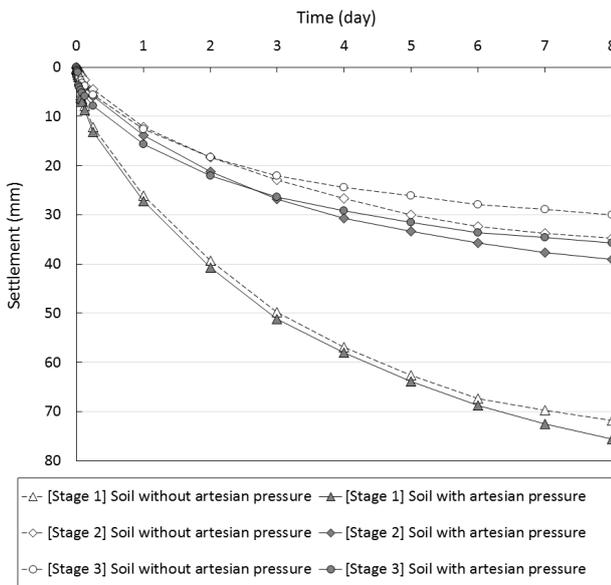


Fig. 6. Settlement with time



(a) Time-settlement curve [1st test]



(b) Time-settlement curve [2nd test]

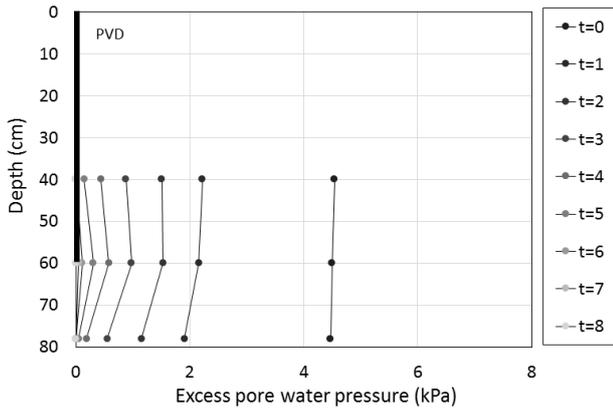
Fig. 7. Time-settlement curve according to loading stage

Fig. 7은 피압의 유·무에 따른 압밀 침하량을 각각 하중 단계 별로 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 첫 번째 실험 결과를, Fig. 7(b)는 두 번째 실험 결과를 나타낸다. 전체적인 거동은 1단계에서 침하가 가장 크게 나타났으며, 하중 단계가 증가할수록 전반적으로 침하가 감소하는 경향을 보였다. 이것은 하중 단계가 증가할수록 지반의 유효응력이 증가하고 이로 인해 지반의 강성이 증가하기 때문이다. 또한 각 하중 단계별 침하는 피압이 작용하는 지반에서 더 크게 나타났으며, 하중 단계가 증가할수록 침하량의 차이가 점차 증가하는 경향을 보였다. 첫 번째 실험 결과에서는 1단계 하중에서 피압이 작용하지 않는 지반의 침하량이 약간 더 크게 나타났으나 이후 하중 단계에서는 피압이 작용하는 지반에서 더 큰 침하량을 나타내었다.

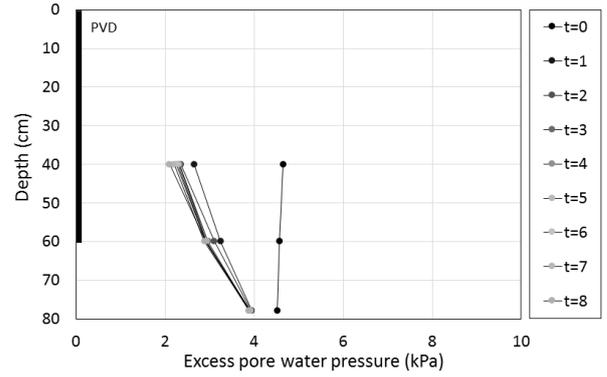
2.3.2 간극수압

Fig. 8과 Fig. 9는 피압의 작용 유·무에 따른 과잉간극수압의 증가 및 소산 변화량을 압밀 하중 단계 별로 각각 나타낸 그림이다. 여기서 범례에 나타난 t의 단위는 하루를 의미한다. 먼저 피압이 작용하지 않는 점토층의 과잉간극수압 변화를 살펴보면(Fig. 8) 하중 재하에 의해 과잉간극수압이 크게 증가하였다가 시간이 지남에 따라 점차 소산하는 경향을 보였다. 과잉간극수압의 소산 속도는 바닥 부분에서 가장 빠르게 소산되었으며, 연직배수재가 관입되어 있는 끝부분에서 전반적으로 가장 늦은 소산 속도를 보였다. 이는 점토층 바닥면의 경우 하부모래층이 배수층 역할을 하여 점토층내의 배수가 원활하게 이루어져 간극수압의 소산이 빠르게 이루어진 반면, 연직배수재가 관입되어 있는 끝부분에서는 배수재의 관입이 부분적으로 되어 있어 소산속도가 상대적으로 더디게 나타난 것으로 판단된다.

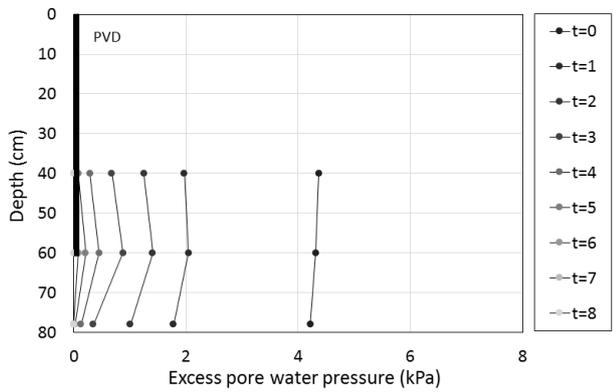
반면 피압이 작용하는 점토층의 경우(Fig. 9) 하중 재하에 의해 생성된 과잉간극수압이 시간 경과에 따라 완전히 소산되지 않고 각각의 깊이에서 일정 값으로 수렴하는 경향을 보였다. 특히 잔류하는 간극수압은 점토층 바닥부분에서 가장 큰 값을 보이며 상부로 올라갈수록 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 점토층 하부에 작용하는 피압이 깊이에 따라 점토층에 선형적으로 작용하여 잔류 간극수압에 지속적으로 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.



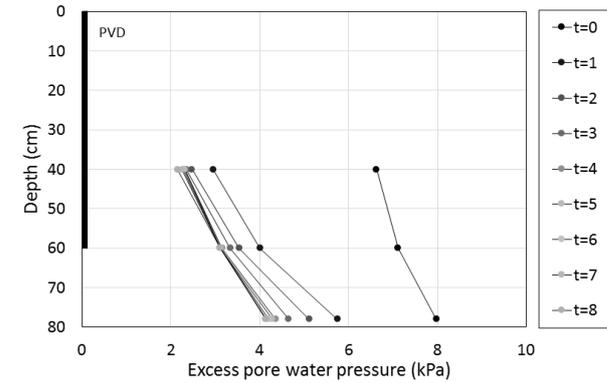
(a) Stage 1 (4.91kPa)



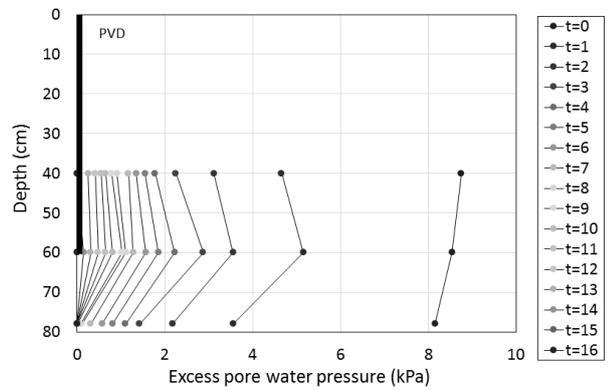
(a) Stage 1 (4.91kPa)



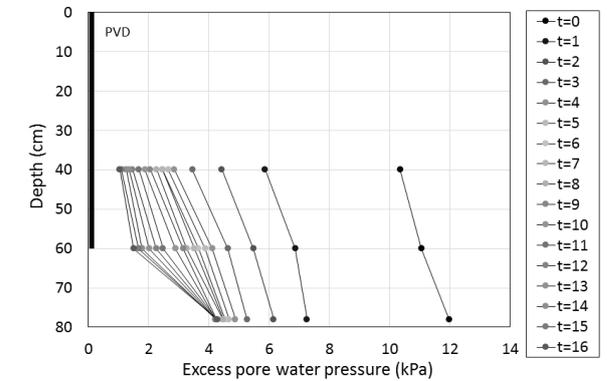
(b) Stage 2 (9.82kPa)



(b) Stage 2 (9.82kPa)



(c) Stage 3 (19.64kPa)



(c) Stage 3 (19.64kPa)

Fig. 8. Excess pore water pressure of soil without artesian pressure

Fig. 9. Excess pore water pressure of soil with artesian pressure

3. 유한요소해석

3.1 입력자료

수치해석 프로그램(PLAXIS 8.0)을 이용하여 피압의 작용 유·무에 따른 점토지반의 압밀거동분석을 수행하였으며, 실내실험결과와 비교하였다. 유한요소해석 수행시 요

구되는 입력자료는 본 연구에서 수행한 실내실험결과와 현장지반조사결과(한국수자원공사, 2015)를 이용하였다(Table 3). 피압의 작용 유·무에 따른 컬럼의 수치해석 모델링은 Fig. 10과 같다. 실내 실험과 동일한 조건으로 모델링 하였으며, 해석 조건을 고려하여 축대칭 해석으로 수행하였다(Fig. 10(b)). 피압의 분포는 Fig. 10(c)와 같이 바닥면에서 5.5kPa, 지표면에서 0kPa로서 깊이에 따라 선형적인

Table 3. Input parameters

Parameters (unit)	PVD	Sand	Clay
γ_{sat} (kN/m ³)	20	20	16
K_x (m/day)	1	1	0,004
K_y (m/day)	1	1	0,002
E_{ref} (kN/m ²)	15000	15000	–
ν	0,3	0,3	–
c	1	1	1
Φ	30	30	27
C_c	–	–	0,853
C_s	–	–	0,119
C_a	–	–	0,022
W	–	–	80
e_0	–	–	2,144
C_{κ}	–	–	0,965
λ^*	–	–	0,118
κ^*	–	–	0,033
μ^*	–	–	0,003
Skemton B	–	–	0,995

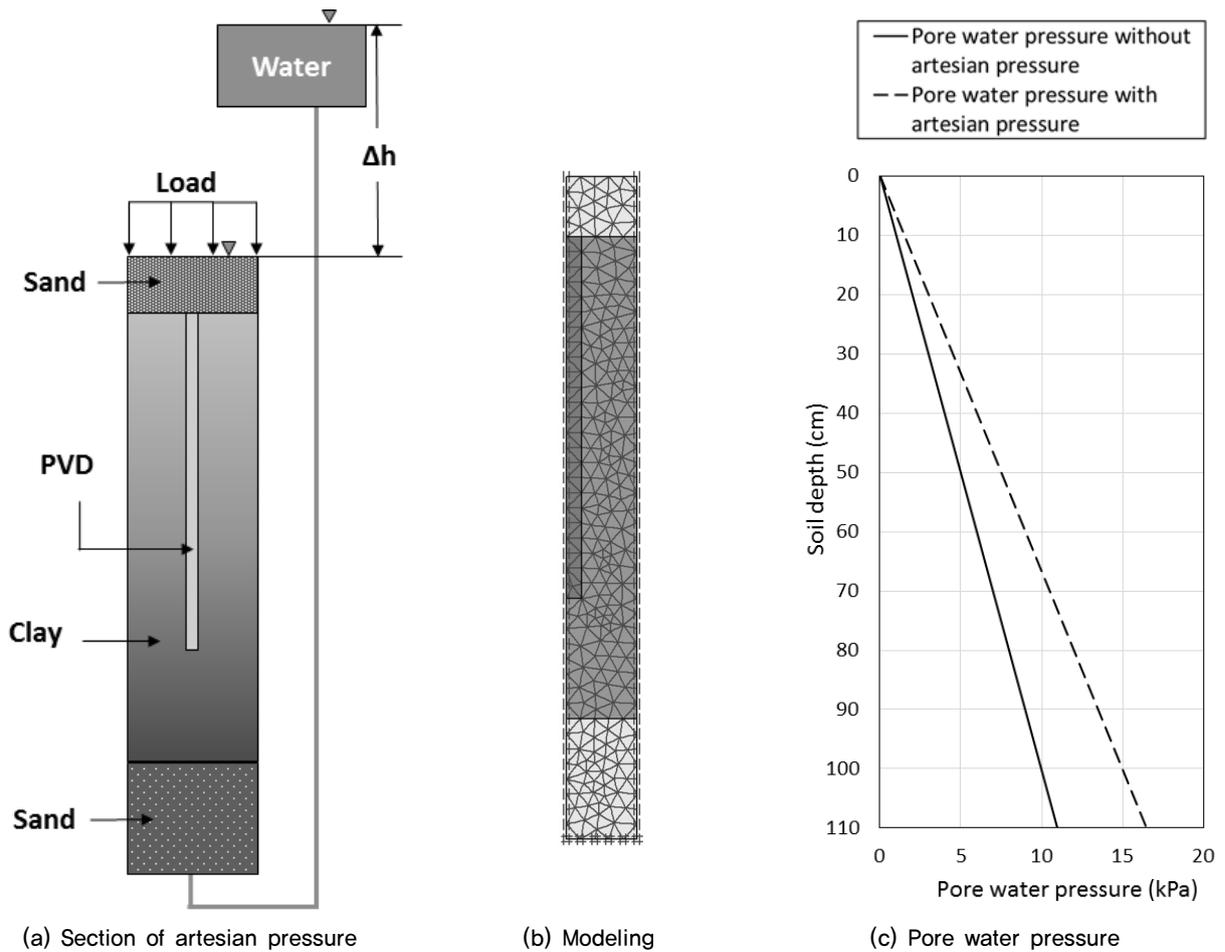
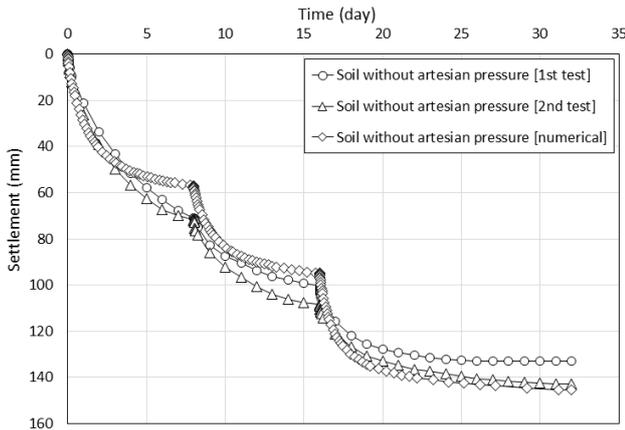
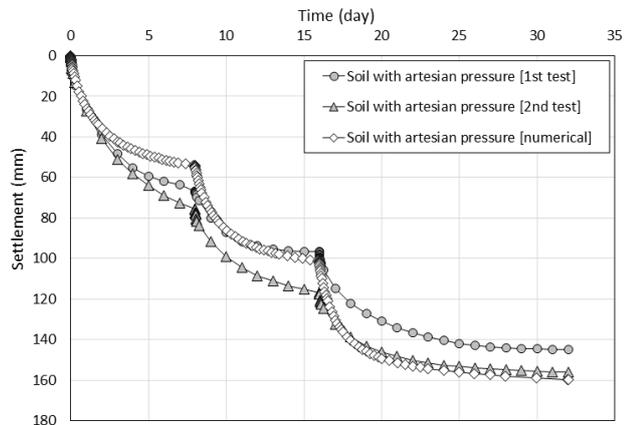


Fig. 10. Axisymmetric analysis for 1-D column test



(a) Soil without artesian pressure



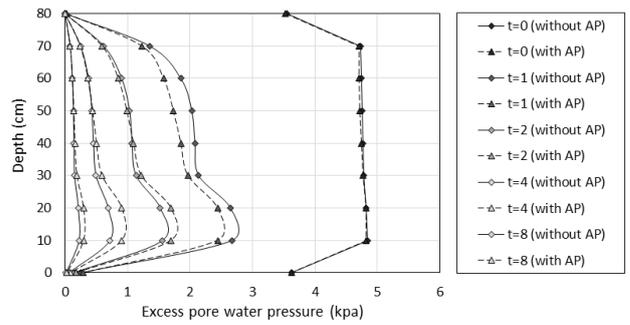
(b) Soil with artesian pressure

Fig. 11. Settlement comparison between experiments and numerical results

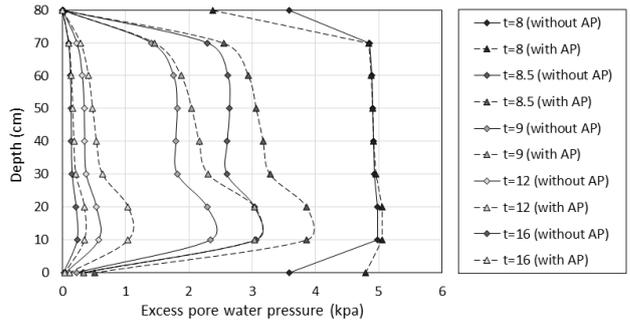
값을 가지는 것으로 간주하여 유한요소해석을 수행하였다.

3.2 유한요소해석 결과

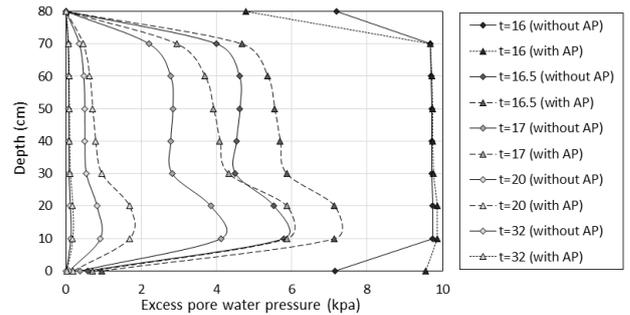
Fig. 11은 실내실험 결과와 유한요소해석 결과를 비교한 것으로서 각각 피압이 작용하지 않는 지반(Fig. 11(a))과 피압이 작용하는 지반(Fig. 11(b))에 대한 시간-침하량 관계 곡선을 나타낸다. 유한요소해석을 통한 최종침하량은 각각 피압이 작용하지 않는 점토층(soil without artesian pressure)에서 약 145.54mm, 피압이 작용하는 점토층(soil with artesian pressure)에서 약 159.61mm로 나타났다. 피압이 작용할 경우 약 14.07mm의 침하가 더 발생하였으며, 이러한 결과는 실내실험결과와 유사한 경향을 나타낸다. 또한 실내실험과 유한요소해석을 통한 시간-침하량 관계를 비교한 결과 전반적으로 침하거동이 유사하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 유한요소해석 결과에서 더 큰 침하



(a) Stage 1 (4.91kPa)



(b) Stage 2 (9.82kPa)



(c) Stage 3 (19.64kPa)

Fig. 12. Variation of excess pore water pressure

경향을 보였다. 이는 실험시 발생하는 벽면 마찰, 시료의 비균질성 등과 같은 오차에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 유한요소해석을 통해 피압의 작용 유무에 따른 점토층의 과잉간극수압 생성 및 소산 정도를 각 하중단계별로 나타낸 것이다. 각각의 하중단계에 따라 일정 시간의 간격으로 점토층 깊이별 과잉간극수압의 크기를 나타낸 것으로 해석 결과를 살펴보면 각 하중 단계 별로 동일한 시간대에 피압이 작용하는 지반(with AP)이 피압이 작용하지 않는 지반(without AP)에 비해 더 큰 과잉간극수압이 유발되는 경향을 보였다. 특히 점토층 하부에서 하중 단계가 증가함에 따라 피압의 작용 유무에 따른 과잉간극수압의 차이가 두드러지게 나타났으며, 하중단계가 증가할수록 과잉간극수압 소산 속도의 차이가 더 크게 나타났다. 이는 하중이 재하됨에 따라 점토층 상부에서는 연직배

수재를 통해 과잉간극수압의 소산이 원활하게 이루어진 반면, 배수재의 관입 끝단 부분에는 피압의 작용으로 인해 간극수압이 추가로 발생하여 점토층 내의 전체 간극수압이 증가되어 나타난 결과로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 실내실험과 유한요소해석 결과를 통해 연직배수재가 부분 관입된 점토지반의 피압 작용 유·무에 따른 압밀거동에 대한 비교 및 분석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 피압의 작용 유·무에 따른 점토층의 압밀거동을 살펴 보기 위해 대형 컬럼 장비를 이용하여 실내실험을 수행하였다. 두 번의 실험 결과 피압이 작용하지 않는 점토층의 침하량이 피압이 작용하는 점토층에 비해 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 피압의 지속적인 작용에 의해 점토층 내에 간극수압이 증가하게 되며 점토의 유효응력이 감소하고, 이로 인해 지반의 강성도가 감소하기 때문이다.
- (2) 피압이 작용하지 않는 점토층의 과잉간극수압 변화를 살펴보면 상재 하중 재하시 과잉간극수압이 증가하였다가 시간에 따라 점차 소산되는 경향을 보였다. 반면 피압이 작용하는 점토층의 경우 피압으로 인해 과잉간극수압이 감소하다 점토층 깊이에 따라 각각 일정한 값에 잔류하는 것으로 나타났다. 잔류간극수압의 크기는 점토층의 깊이에 따라 다르게 나타났는데 이는 하부에서 발생하는 피압이 높이에 따라 선형적으로 작용하여 나타난 결과로 판단된다.
- (3) 유한요소해석 결과 압밀 침하량은 피압이 작용하지 않는 점토층의 경우 약 145.81mm, 피압이 작용하는 점토층의 경우 약 164.59mm의 침하가 발생하였으며, 이러한 결과는 실내실험에서 얻은 결과와 유사한 경향을 나타낸다.
- (4) 유한요소해석을 통해 피압의 작용 유·무에 따른 점토층의 과잉간극수압 생성 및 소산을 비교한 결과 피압이 작용하는 지반에서 더 큰 과잉간극수압이 발생하는 것으로 나타났다. 특히 점토층의 하부에서 차이가 두드러지게 나타나는 경향을 볼 수 있는데 이는 연직 배수재의 관입 깊이 및 피압의 영향으로 인해 나타난 결과로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

Reference

1. Baek, S.H. (2002), Characterisation and Geotechnical Properties of Pusan Clays by Insitu Tests, Dong-a University, Doctor's thesis, pp.1-249 (In Korean).
2. Choi, Y.I. (2000), Consolidation Behavior of Clay Soils with Artesian Pressure, Dong-a University, Master's thesis, pp. 3-61 (In Korean).
3. Chung, S.G. and P.H. Giao. (2001), Examination of Pusan clays at a reference testing site, Lowland technology international, International Association of Lowland Technology (IALT), Vol. 3, No.2, pp.1-14.
4. Chung, S.G., Lee, N.K., Lee, J.M., Min, S.C., Hong, Y.P. (2010), Hydraulic Characteristics of Busan Clay in the Floodplain of the Nakdong River Delta, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.26, No.11, pp.47-61 (In Korean).
5. Chung, S.G., P.H. Giao, T.S. Nagaraj, and J.M. Kwag (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., Yu, G.Y. (1999), A Study of Artesian Characteristics in Yangsan/Mulgeum Site, KGS Fall '99 National Conference, pp.123-130.
7. 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, Doctor's thesis, pp.8-195.
8. Jang, Y.S., Kim, Y.W. (2000), A Study of Installation Depth of Vertical Drain for weak Clay Soils with Artesian Pressure using 3-D Numerical Flow Model, Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol.20, No.1-C, pp.39-46 (In Korean).
9. Kim, H.T., Cho, J.H., Yoo, J.Y., Ro, J.K., 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).
10. Kim, S.K., Kim, H.I., Hong, B.M., Kim, H.T. (1999), Consolidation Analysis of Vertical Drain Considering Artesian Pressure, KGS conference '99, pp.62-69 (In Korean).
11. Kim, T.H., Yu, J.M., Lee, M.J., Bae, K.H., 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., Do Thank Hai. (2010), Effect of Leaching on the Compressibility of Busan Clay, Journal of Civil Engineering,

Vol.14, No.4, pp.291-297.

13. Kim, Y.T., T.H. Do. (2011), Experimental Evaluation of Leaching Effects on the Compressibility of Marine Clay and its Strain Rate Dependency, Marine Georesources and geotechnology, Vol.29, No.1, pp.16-29.
14. Korea water resources corporation. (2015), Subsoil investigation report of Busan Eco-Delta City – phase 1 & area 3, pp. 1-468 (in Korean).