

낙동강 하구 상부퇴적사질토의 통수능 평가

Evaluation of Discharge Capacity of Upper Sand Deposit at the Nakdong River Estuary

정진영¹, 김태형², 임은상³, 황용기^{4*}, 김규종⁵

Jin-Yeong Jeong¹, Tae-Hyung Kim², Eun-Sang Im³, Woong-Ki Hwang^{4*}, Gyu-Jong Kim⁵

¹Non-Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejeong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejeong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

³Member, Principal Researcher, Infrastructure Research Center, K-water Institute, 200beon-gil, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Deajeon 34350, Republic of Korea

⁴Member, Post-doc. Researcher, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejeong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Republic of Korea

⁵Non-Member, President, Sung-eun Geotech, 152 Jaseong-ro, Nam-gu, Busan 48475, Republic of Korea

ABSTRACT

In this research, it was investigated that whether the upper sand deposited in Nakdong River Estuary Delta region has the role of horizontal drains like sand mat. The results from tests for particle size distribution and permeability of the upper sand deposit did not meet completely the criteria for the horizontal drain material. Thus, numerical analysis has been conducted additionally. Numerical analyses of consolidation of soft soils with upper layer of sand deposit are conducted in both the sand mat with a thickness of 1m and the upper sand deposit with 1, 2, 3, and 4 m of thickness and their results are compared. As the results of numerical analysis, the upper sand deposit with a thickness of 2m or more may play the role of horizontal drains similar to a sand mat. If a PVD is installed, the ability of upper sand deposit as horizontal drains is increased. Form this study, it was concluded that the upper sand deposited in Nakdong River Estuary Delta has the role of horizontal drain.

요 지

본 연구에서는 낙동강 하구 델타지역에 위치한 연구지역의 상부퇴적사질토층이 샌드매트와 같은 수평배수재로서의 통수능 기능을 수행할 수 있는지를 검토하였다. 상부퇴적사질토에 대한 입도분포분석 및 투수시험 결과 일부 기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타나 수치해석연구가 추가로 수행되었다. 델타지역 연약지반위에 샌드매트 1m 포설할 때와 연약지반위에 퇴적사질토층이 1, 2, 3, 4m 두께로 형성된 경우에 대한 압밀해석을 실시하였다. 그 결과 두께가 2m 이상이 되면 델타지역 퇴적사질토층은 샌드매트처럼 수평배수층으로 기능을 수행할 수 있는 것으로 나타났다. PVD를 설치한 경우 퇴적사질토층의 수평배수층 역할이 더욱 증가되었다. 본 연구를 통해 낙동강 델타 지역의 상부퇴적사질토층의 수평배수재로서의 기능이 확인되었다.

Keywords : Sand mat, Permeability, Upper Sand Deposit, Horizontal Drains

Received 20 May. 2017, Revised 22 May. 2017, Accepted 21 Jun. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-51-410-4460; Fax: +82-51-410-4460

E-mail address: gold-a1142@nate.com (W.-K. Hwang)

1. 서론

Bak(1998)과 Kim et al.(2006)의 연구 결과를 보면, 낙동강 삼각주 퇴적분지는 제3기 동안 전단작용에 의해 단층곡이 형성되고 낙동강 하구부분은 분지로 진화되었다. 분지의 형성 초기 해수면은 현재의 해수면에 도달하지 못하였으며, 직선상의 단층곡을 따라 운반된 퇴적물은 낮은 지형을 이루는 부분에 퇴적(호성환경)되었다. 홀로세 동안 최후기 빙하의 후퇴로 해수면 상승과 함께 해침이 수반되고, 호성환경에서 해성환경으로 퇴적환경이 변화되었다. 홀로세 동안 해수면의 지속적 상승과 함께 쇄설성 퇴적물의 공급으로 삼각주가 성장하게 되었으며 압밀침하를 유발하는 두꺼운 점토층을 퇴적시켰다. 또한 점토층이 샌드심(sand seam)을 포함하고 있고, 일부 지역의 경우 두꺼운 사질토 층이 점토층 상부 및 하부에 존재하는 것으로 알려져 있다.

낙동강 하구 델타지역은 국내에서 퇴적층의 심도가 가장 깊은 연약지반(최대 70m)으로 알려져 있다. 상부에는 실트질 충적토 또는 사질토층이 분포하며 아래로 연약한 실트질 점토층, 모래층 및 자갈층 순이다. 이 지역에서는 단지 조성을 위해 연직배수공법과 재하성토에 의한 전형적인 연약지반 개량공법이 일반적으로 적용되고 있다. 또한 장비의 주행성 확보 및 원활한 배수를 위해 토목섬유와 모래(또는 사석)를 수평배수층으로 포설하는 보편적 방법을 적용하고 있다. 하지만 낙동강 하구 델타지역은 지표면에 연약지반이 바로 노출된 상태가 아닌 퇴적사질토 하부에 분포하고 있으며, 에코델타 시티가 예정된 지역의 경우 상부에 약 4~10m의 깊이로 퇴적사질토 층이 형성되어 있어(K-water, 2014), 서해안과 동일하게 토목섬유와 수평배수층 포설이 필요한 지에 대한 연구가 필요한 실정이다(Kim et al., 2015; 2016a).

특히 약 4~10m 정도의 두께로 형성되어 있는 상부퇴적사질토의 수평배수층 역할 규명이 우선적으로 필요한 시점이다. 델타지역에서는 현재 단지 1단계 조성사업이 진행중이고, 또 2, 3 단계 단지조성 사업이 예정되어 있는데 대부분 연약지반 개량에 있어 수평배수층 역할을 할 수 있는 1m 정도의 모래나 사석층 포설이 예정되어 있다(Busan Metropolitan Corporation, 2016). 이것은 설계나 시공 측면에서 대단히 낭비적인 요소일 수 있으므로 신중한 검토가 요구된다(Kim et al., 2016b).

기존문헌을 살펴보면 낙동강 델타지역 점성토에 대한

투수성 연구는 Chung et al.(2010)에 의해 연구되었으나, 상부퇴적사질토층의 수평배수층 역할 규명과 관련된 연구는 많이 진행되지 않은 상태로 이 부분에 대한 연구의 필요성이 시급히 요구된다(Kang, 2011; 김상규 등, 2014; Kim et al. 2015, 2016a). Kim et al.(2016a)은 상부퇴적사질토층의 수평배수층으로서의 기능을 알아보기 위해 입도분석과 투수시험을 수행하였다. 하지만 수평배수재로서의 기준과 관련한 깊이 있는 분석은 이루지지 않았고, pilot test나 수치해석적 연구의 필요성을 간략하게 언급하였다.

본 연구에서는 Kim et al.(2016a) 연구의 연장으로 기존 실험자료의 분석과 수치해석을 통하여 낙동강 델타 연약지반 상부 퇴적사질토층의 수평배수층으로서의 기능을 규명하였다. 기존 실험자료는 KCS 11 30 15 : 2016 수평배수공 기준을 활용하여 분석하였다. 상부 퇴적사질토층에 대한 투수시험 결과와 입도분포에 대해 KCS 기준에서 모래에 제시된 기준은 투수계수가 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이상, D_{15} : 0.075mm~0.9mm, D_{85} : 0.4mm~8.0mm, 0.08mm 통과량 : 15% 이하의 재료를 추천하고 있다. 수치해석에서는 상부 퇴적사질토층의 분포 두께에 따른 지반의 평균압밀도 변화를 유한요소 프로그램인 Midas GTS NX를 사용되었다. 프로그램의 검증을 위하여 Biot(1941)정해와 GTS NX 수치해석 결과 값을 먼저 비교하였다. 상부 퇴적사질토층이 샌드매트 역할을 할 수 있는지를 조사하기 위하여 상부퇴적사질토층의 두께를 1.0~4.0m로 변화시켰다. 또한 PVD 미타설, 1.5m, 2.0m 간격으로 타설하였을 때를 모사하여 해석을 수행하였으며, 투수계수의 영향도 해석을 통해 검토하였다.

2. 실험에 의한 퇴적사질토층의 평가

2.1 입도분포곡선 이용

수평배수재로서의 역할은 입도분포를 이용해서 판단해 볼 수 있다. 일본의 규정은 Skempton이 제안한 입도분포로서, $k > 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, $D_{15} = 0.074 \sim 0.84 \text{mm}$, $D_{85} = 0.4 \sim 5.0 \text{mm}$ 로 규정하고 있다. 캘리포니아주의 시방규정은 Skempton이 제시한 드레인용 입도분포곡선과 유사하나 통과량 5%이상에서의 입경으로 비교적 크게 규정하고 있다(Kim et al., 2016a).

국내에서는 건설기준코드 표준시방서의 공통편 연약지반개량공사 수평배수공(KCS 11 30 15 : 2016)에 수평배

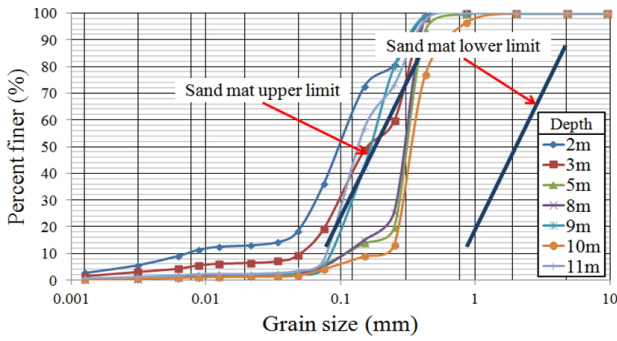


Fig. 1. Particle size distribution curve of upper sand deposit with required criteria for sand mat (Kim et al., 2016a)

수층에 대한 기준을 제시하고 있다. 모래의 경우, 투수계수가 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이상이고 D_{15} : 0.075mm~0.9mm, D_{85} : 0.4mm~8.0mm, 0.08mm 통과량(#200체): 15% 이하의 재료로 Fig. 1의 기준내의 입도분포를 요구하고 있다. 쇄석의 경우, 0.08mm체 통과량 : 15% 이하인 재료를 기본적으로 요구하고 있다. 만약 세립분의 함량 또는 입도가 품질기준을 초과할 때에는 “투수시험을 실시하고 공사감독자의 승인을 받아 사용할 수 있다”라고 명시되어 있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016).

Fig. 1은 연구 대상지역에서 심도별로 채취된 퇴적사질토의 입도분포곡선을 KCS 11 30 15 : 2016 기준과 비교하여 샌드매트로서의 적용가능성을 평가한 것이다. 그림을 보면 일부 구간의 경우 세립분 함유율이 20%이상으로 샌드매트 기준을 만족하지 못하나, 세립분 함유량(5% 이하)이 낮을 경우 기준을 만족하는 것을 볼 수 있다.

2.2 투수시험

Kim et al.(2016b)은 현장투수시험과 실내투수시험을 통해 상부 퇴적사질토층의 투수계수에 관한 평가를 실시하였다. Table 1은 투수시험 결과를 정리한 것으로 수평배수재 투수기준($1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 이상)에 미달하는 것을 알 수 있다. 낙동강 델타 지역에서 상부퇴적사질토의 수평배수층 역할은 그 분포 두께를 보면 충분히 가능하다고 판단되나 입도분석과 투수시험 결과 만족하지 못하는 부분이 있

어 이를 검증하기 위해서는 추가적인 연구가 요구되는 것을 알 수 있다.

3. 수치해석에 의한 퇴적사질토층의 평가

3.1 적용 프로그램 및 검증

본 연구에 사용된 수치해석 프로그램은 범용 지반해석 유한요소 프로그램인 Midas GTS NX이며 시공단계 압밀 해석을 수행하였다. 연구의 신뢰성을 얻기 위해 해석에 사용된 Midas GTS NX 프로그램을 Biot(1941)이 제시한 압밀이론 정해 결과와 비교하였다.

이 검증 예제는 포화된 다공성 흙의 일차원 탄성압밀을 모사한 것이다. Biot(1941)의 정해에서 표현된 과잉간극수압 $p_w^{ex} (= p_w - p_{w0})$ 과 수직변위 u_y 는 다음과 같다.

$$p_w^{ex} = 2t^\sigma \frac{\alpha_f - \alpha_i}{\alpha_c \alpha_f} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{M} \sin\left(\frac{My}{H}\right) \exp(-M^2 T) \quad (1)$$

$$u_y = 2t^\sigma (\alpha_f - \alpha_i) H \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{M^2} \cos\left(\frac{My}{H}\right) (1 - \exp(-M^2 T)) \quad (2)$$

$$M = \frac{(2n+1)\pi}{2} \quad (3)$$

$$T = \frac{c_v t}{H^2} \quad (4)$$

$$\alpha_f = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} = \frac{1}{\lambda+2\mu} \quad (5)$$

$$\alpha_i = \frac{\alpha_f}{1 + \alpha_c^2 \alpha_f (n\beta_w)^{-1}} \quad (6)$$

$$c_v = \frac{k_w}{\gamma_w (\alpha_c^2 \alpha_f + n\beta_w)} \quad (7)$$

여기서 α_c 는 Biot의 연계계수이고, α_f 는 최종압축률이며 α_i 는 순간압축률이다. 그리고 c_v 는 압밀계수이고 t^σ 는

Table 1. Evaluation results of the upper sand deposit as horizontal drains based on the field and laboratory tests (Kim et al., 2016a)

Items	Criteria (cm/sec)	Test Result (cm/sec)	Evaluation
Field permeability test	1.0×10^{-3}	$1.17 \times 10^{-3} \sim 2.46 \times 10^{-4}$	Not meet
Lab. permeability test	1.0×10^{-3}	$1.17 \times 10^{-3} \sim 7.43 \times 10^{-4}$	Not meet

Table 2. Soil parameters used in numerical analysis

Parameters	Value
Young's modulus (E)	10^3 kPa
Poisson's ratio	0.25
Porosity	0.2
Hydraulic conductivity (k)	10^{-2} cm/sec
Biot's coupling coefficient (α_c)	1.0
Surface traction loading (t^σ)	10^2 kPa
Compressibility of water (β_w)	5.1×10^{-8} 1/kPa

표면응력, H 는 지반의 두께를 나타낸다.

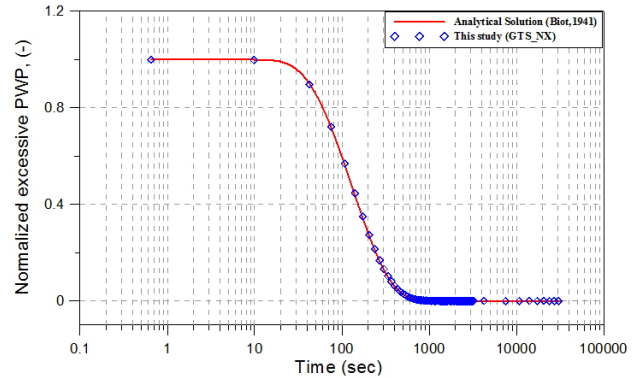
일차원 압밀에 대한 검증 모델에서의 흙기둥의 높이는 2m이며 하중은 등분포하중 10^2 kPa을 재하 하였다. 경계 조건은 변형에 대해서는 좌우측 경계에서 수평변위를 고정으로 하고, 동시에 저면 경계에서는 연직 변위를 고정 경계로 설정하였다. 지하수위는 지표면에 위치하고 있으며 지반내 간극수압 분포는 정수압분포를 나타낸다. Table 2는 해석에 사용된 지반 물성치로 프로그램의 검증을 위하여 가상의 흙에 대한 값을 나타낸다.

GTS NX 수치해석 결과와 Biot(1941)의 정해 식 (1), (2)와의 비교는 Fig. 2와 같다. 그림에서 보이는바와 같이 수치해석 결과와 Biot(1941) 정해 계산값이 정확하게 일치한다. 따라서 본 연구의 GTS NX를 이용한 수치해석 결과는 신뢰성을 가지고 있음을 알 수 있다.

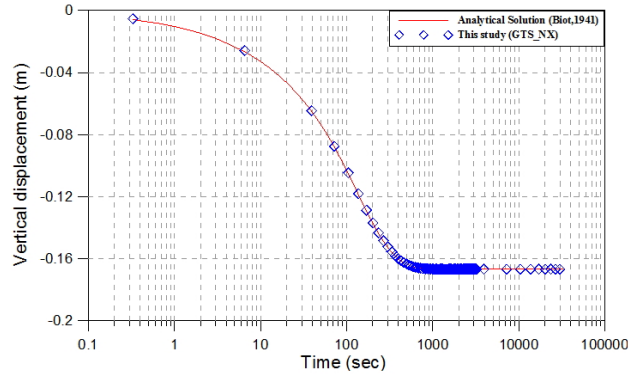
3.2 해석조건

샌드매트 포설 시와 상부 퇴적사질토층의 분포 두께에 따른 지반의 평균압밀도 변화를 이용하여 상부 퇴적사질토층이 샌드매트 역할을 할 수 있는지를 조사하기 위하여 상부퇴적사질토층의 두께를 1.0~4.0m로 변화시켰다. 또한 PVD 미타설, 1.5m, 2.0m 간격으로 타설하였을 때를 모사하여 해석을 수행하였으며, 투수계수의 영향도 해석을 통해 검토하였다. 성토기간은 6개월 6단계 성토, 방치기간은 8개월을 적용하였다. 성토재 단위중량은 $1.7(\text{tf/m}^3)$ 로, 단계별 성토고는 1m, 성토 높이 6m, 성토단계는 등분포하중 재하로 모사하였다. 단계별 압밀해석 및 전체과정은 시공단계해석으로 해석을 진행하였다. 해석단면은 Fig. 3과 같다.

압밀해석에 적용되는 지반 물성치는 델타 지역에서의 현장계측 및 기본적인 역학시험으로부터 얻은 값과, 문헌

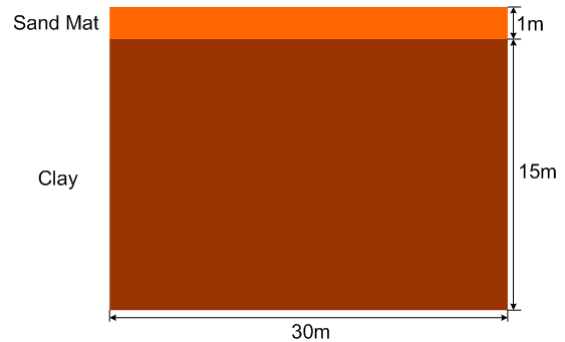


(a) Normalized excess pore water pressure at the bottom of column

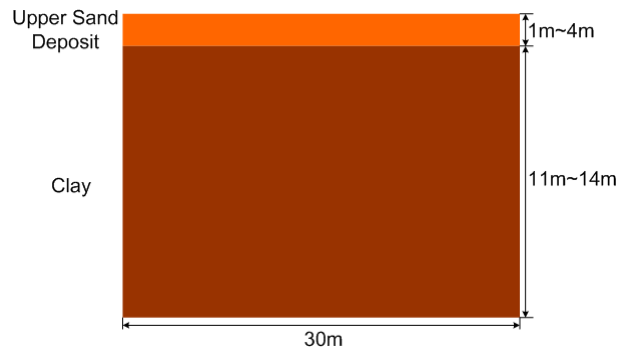


(b) Vertical displacement at the top of column

Fig. 2. Comparison of numerical analysis and Biot's analytical solution



(a) Soil stratum with sand mat of 1m



(b) Soil stratum with variable upper sand deposit

Fig. 3. Analysis conditionssolution

Table 3. Soil parameters used in numerical analysis

Parameters	Sand mat	Upper Sand deposit	Clay
Modulus of Elasticity (kPa)	10000	15000	3000
Poisson's Ratio	0,3	0,3	0,38
Unit Weight (kN/m ³)	20	20	15
Unit Weight (Saturated) (kN/m ³)	21	21	16
Cohesion (kPa)	5	5	-
Friction Angle	36	36	-
Permeability Coefficients (cm/sec)	1,7×10 ⁻²	2,46×10 ⁻⁴	2,31×10 ⁻⁶
OCR	-	-	1
Slope of consol line (λ)	-	-	0,118
Slope of over consol line (κ)	-	-	0,033
Critical state specific vol. (I)	-	-	3,579
Slope of critical state line (M)	-	-	0,772

조사를 통해 보편적으로 사용되는 값을 이용하였다(Table 3). 연구 대상 지역이 단지 개발 지역임을 고려하여 무한한 수평거리로 가정하여 2차원 평면 변형을 해석을 수행하였으며 지반은 4절점 4각형 등매개요소를 이용하여 모델링하였다. 하중조건은 성토단계별로 성토하중에 해당하는 등분포 하중을 재하 함으로써 시공단계를 모사하였다. 경계조건은 변형에 대해서는 좌우측 경계에서 수평변위를 고정하고, 동시에 저면 경계에서는 연직 및 수평 변위를 고정 경계로 설정하였다. 지하수위는 샌드매트 포설 지반에는 실제 설계와 유사하게 샌드매트 층 아래에 설정 하였고, 상부 퇴적사질토 지반에는 지하수위가 지표면과 일치하게 설정하였다. 지반구성모델은 점성토 지반은 수정 Cam-Clay 모델(Nam, 1995)을, 샌드매트와 사질토층에 대하여서는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다.

3.3 해석 결과 및 고찰

3.3.1 샌드매트 두께(1m) 적절성 검증

샌드매트의 기능 중 간극수의 배출기능만을 고려하여 샌드매트의 두께를 결정할 때 지배되는 인자는 샌드매트의 투수계수(k), 배수량(Q) 및 배수거리(L)이다. 성토로 인한 지반의 평균 침하속도를 S (cm/day)라 하고, 이 침하량이 연약층의 압밀에 의한 것이라 한다면 성토 단위 길이 당 압밀로 인한 전체 배수량 (Q)은 $L \cdot S$ 가 된다.

샌드매트의 두께를 h , 투수계수를 k , 샌드매트의 단면적을 A 라 하면 배수량은 $k \cdot i \cdot A$ 로 표시된다. 이때 i 는 동수구배로 $i = \Delta h_w / L$ 가 된다. 여기서 Δh_w 는 샌드매트

내 압력수두이다. 샌드매트의 배수만을 연약층의 압밀배수로 본다면 다음 식이 성립된다(Kim, 2008).

$$Q = L \cdot S = k \cdot i \cdot A = \frac{k \cdot \Delta h_w \cdot h}{L} \quad (8)$$

위 식을 Δh_w 에 대하여 정리하면,

$$\Delta h_w = \frac{L^2 \cdot S}{k \cdot h} \quad (9)$$

즉, 샌드매트두께를 가정하고 위의 식을 이용하여 Δh_w 를 구한 후 이 값이 h 보다 작을 경우 샌드매트를 통하여 배수가 원활하게 이루어진다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 샌드매트 두께 $h = 1\text{m}$ 가정하고 $k = 1.7 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$, $L = 15\text{m}$, $S = 0.78 \text{cm/day}$ 을 이용하여 식 (9)을 계산한 결과, 샌드매트 내 압력수두 $\Delta h_w = 12\text{cm}$ 로 나타났다. 따라서 $\Delta h_w < h$ 이므로 샌드매트두께 1m는 적합하다고 볼 수 있다.

3.3.2 해석결과

1) 상부퇴적사질토층의 두께 영향

Fig. 4는 PVD가 시공되지 않은 점토지반에서 샌드매트 1m포설 시와 퇴적사질토층의 두께 1, 2, 3, 4m 일 때의 평균압밀도를 나타낸 것이다. 평균압밀도는 침하량 기준에 의한 평균압밀도 산정 식 (10)을 이용하여 구하였다.

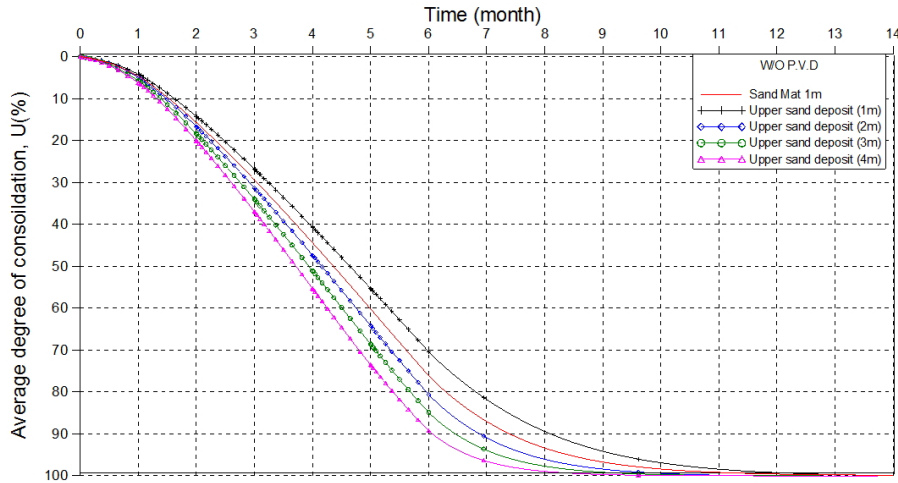


Fig. 4. Average degree of consolidation of clay without PVD installation

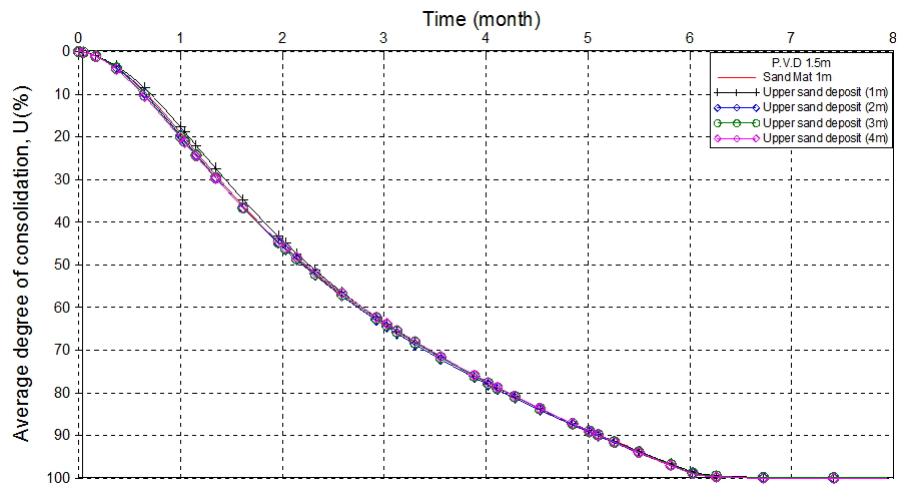


Fig. 5. Average degree of consolidation of clay with PVD installation space of 1.5 m

$$U_{av} = \frac{S_t(\text{임의 시간에서 침하량})}{S_c(\text{최종 압밀침하량})} \quad (10)$$

상부퇴적사질토층의 두께가 1m일 때는 낮은 투수계수로 인하여 샌드매트 1m를 포설한 때 보다 압밀지연이 발생되지만 두께가 2m이상일 때는 압밀이 촉진됨을 알 수 있다. 이는 퇴적사질토층의 두께가 어느 이상 확보되면 퇴적사질토층도 샌드매트와 같은 수평배수층 역할이 가능하다는 것을 보여주는 것이다. 즉, 본 연구지역의 경우 상부 퇴적사질토층의 두께가 2m 이상 되면 상부배수층의 역할을 수행할 수 있는 것으로 판단된다.

2) PVD 설치간격의 영향

Fig. 5는 앞의 해석과 동일한 지반조건에 대하여 추가적으로 PVD를 1.5m 간격으로 시공했을 때의 평균압밀도를

나타낸 것이다. 전체적인 압밀 완료 시점이 PVD를 시공하지 않은 이전 해석의 결과와 비교하여 빠름을 알 수 있다. 퇴적사질토층이 1m인 경우에는 샌드매트 포설 시와 비교하여 초기에 압밀이 약간 지연되는 거동을 나타내지만 전체적으로 거의 동일한 경향을 보인다. 퇴적사질토층이 2, 3, 4m인 경우에는 퇴적사질토층의 두께에 따른 평균 압밀도의 변화 과정에 큰 영향을 나타내지 않으며 샌드매트 포설 시와 유사한 거동을 보이는 것으로 나타났다. PVD가 설치된 경우 퇴적사질토층의 두께에 상관없이 압밀완료 시점은 유사함을 알 수 있다. 이는 지반내 과잉간극수압이 상부의 샌드매트나 상부퇴적사질토층이 아니라 지반에 설치된 PVD에 의해 지배적으로 소산되기 때문인 것으로 판단된다. 즉 상부퇴적사질토층이 존재하는 지역에 PVD를 설치하면 샌드매트를 포설한 경우와 같은 압밀 효과가 크게 개선되는 것을 알 수 있다. 상부퇴적사질토층

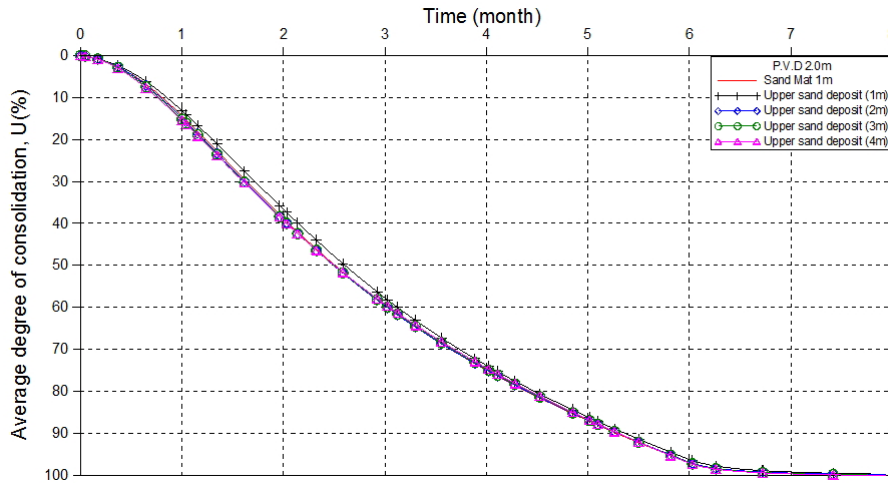


Fig. 6. Average degree of consolidation of clay with PVD installation space of 2.0 m

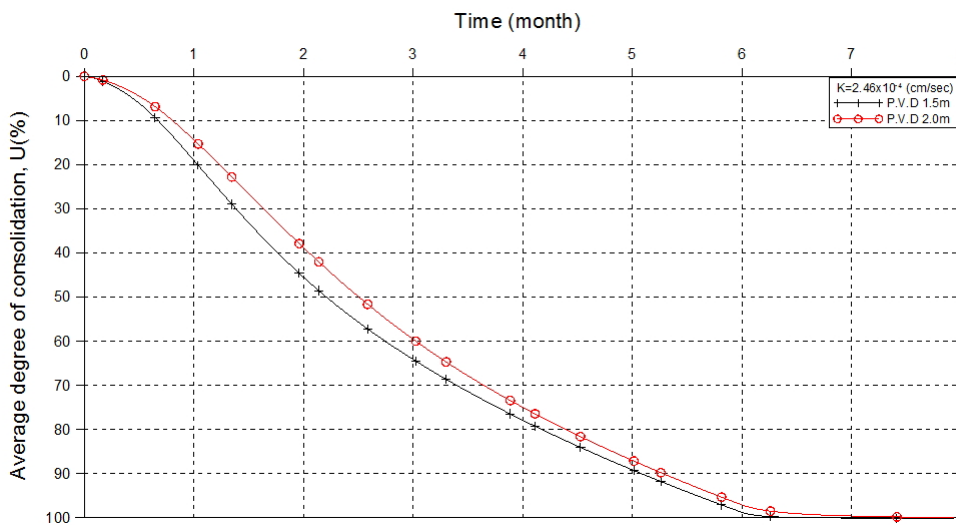


Fig. 7. Comparison of average degree of consolidation of clay with upper sand deposit 2m and different PVD installation spaces

두께의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 PVD를 2m 간격으로 시공 했을 때 의 평균압밀도의 변화를 나타낸다. 이 경우 평균압밀도의 변화 과정은 PVD 1.5m 시공했을 때와 거의 유사한 결과가 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 PVD 설치 간격이 평균압밀도의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 퇴적사질토층 두께가 2m인 경우의 평균압밀도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것처럼 시간에 따른 평균압밀도의 거동에 약간의 차이가 있지만 압밀완료 시점은 서로 비슷함을 알 수 있다. PVD가 1.5m로 설치된 경우가 2.0m 보다 성토 중 압밀이 빨리 진행되지만 최종압밀 종료는 비슷한 시기에 도달하는 것을 알 수 있다.

3) 투수계수 영향

투수계수가 상부퇴적사질토층의 통수능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 $k=2.46 \times 10^{-4}$ cm/sec의 투수계수의 두 개의 투수계수($k=2.46 \times 10^{-5}$ cm/sec와 $k=2.46 \times 10^{-6}$ cm/sec)에 대해 추가적으로 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 8, Fig. 9와 같다.

상부퇴적사질토의 투수계수가 $k=2.46 \times 10^{-5}$ (cm/sec)인 경우에는 $k=2.46 \times 10^{-4}$ (cm/sec)인 경우에 비하여 압밀이 지연되는 거동을 보이거나 퇴적사질토층의 두께가 2m 이상이면 샌드매트의 기능을 할 수 있음을 알 수 있다. 반면 $k=2.46 \times 10^{-6}$ (cm/sec)일 때는 퇴적사질토층의 두께가 4m인 경우에도 샌드매트와 같은 통수능 기능은 발휘되지 않는 것을 알 수 있다. 즉 상부퇴적모래층의 투수계수가 낮은 경우에는 샌드매트와 같은 통수능 기능을 할 수

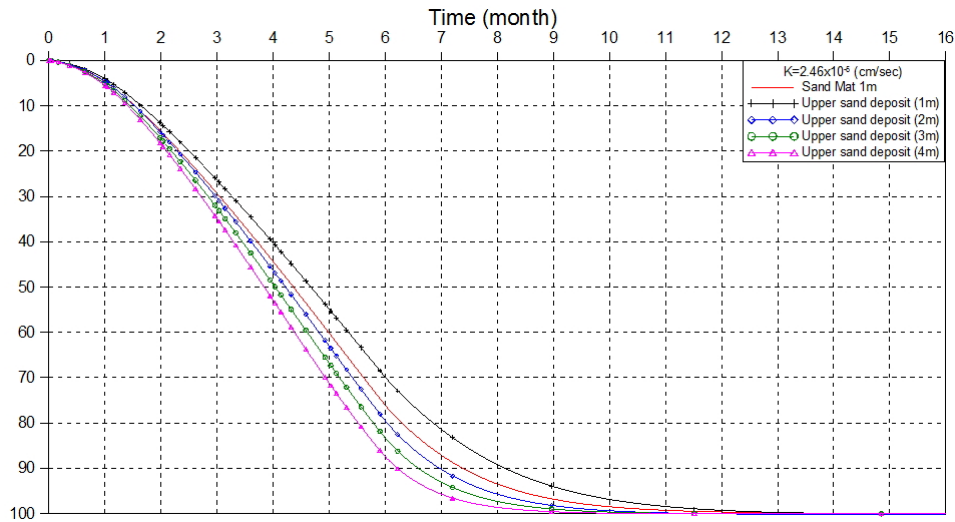


Fig. 8. Average degree of consolidation of clay with permeability $k = 2.46 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})$ of upper sand deposit

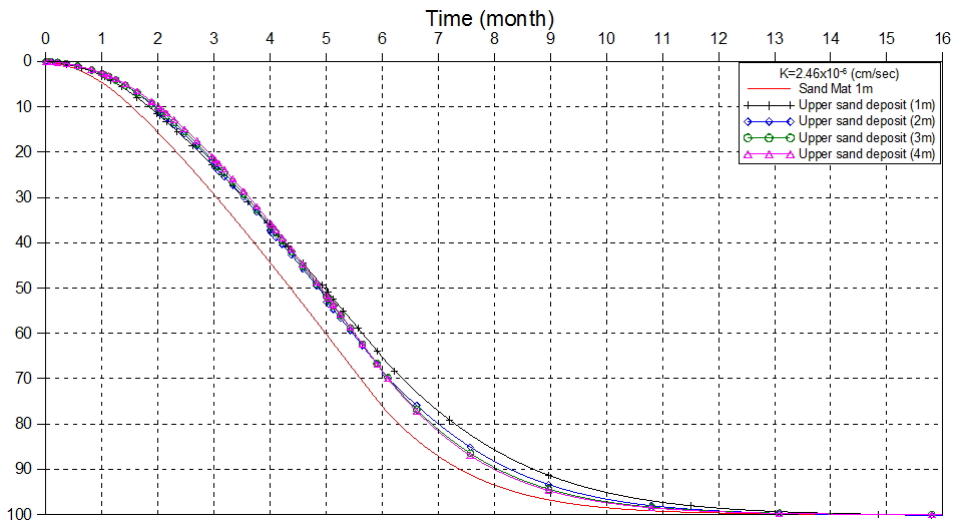


Fig. 9. Average degree of consolidation of clay with permeability $k = 2.46 \times 10^{-6} (\text{cm/sec})$ of upper sand deposit

없으므로 추가적인 샌드매트 포설이 요구된다.

Fig. 10은 투수계수에 따른 두께별 평균압밀도가 90% 도달하는 시간을 서로 비교한 그래프이다. 퇴적사질토층의 두께가 두꺼워 질수록 90%압밀에 도달하는 시간이 감소하고, 투수계수의 영향이 상부퇴적사질토 두께가 클수록 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Figs. 11과 12는 PVD 2.0m 시공 시에 상부퇴적사질토의 투수계수가 각각 $k = 2.46 \times 10^{-5} (\text{cm/sec})$ 와 $k = 2.46 \times 10^{-6} (\text{cm/sec})$ 인 경우의 시간에 따른 평균압밀도의 변화를 나타낸 것이다. 두 경우 압밀완료 시점에 약간의 차이는 있지만 비슷한 압밀 경향을 보이며 이는 과잉간극수압의 소산이 PVD에 의하여 지배적으로 이루어지기 때문으로 판단된다. 따라서 PVD가 설치된 경우에는 상부퇴적사

질토층의 투수계수가 작은 경우라도 샌드매트와 같이 충분한 통수능 역할을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 연약지반상의 상부 퇴적사질토층이 연약지반 공사 시 일반적으로 시공되는 샌드매트와 같은 수평배수재로서의 적용 가능성에 대해 연구하였다. 이를 위하여 퇴적사질토에 대한 실내시험을 수행하고 상부 퇴적사질토층이 존재하는 연약지반에 대한 시공단계별 압밀거동을 수치해석을 통하여 검토하였다. 그 결론은 아래와 같다.

- (1) 상부 퇴적사질토의 입도분포곡선은 세립토로 인하여

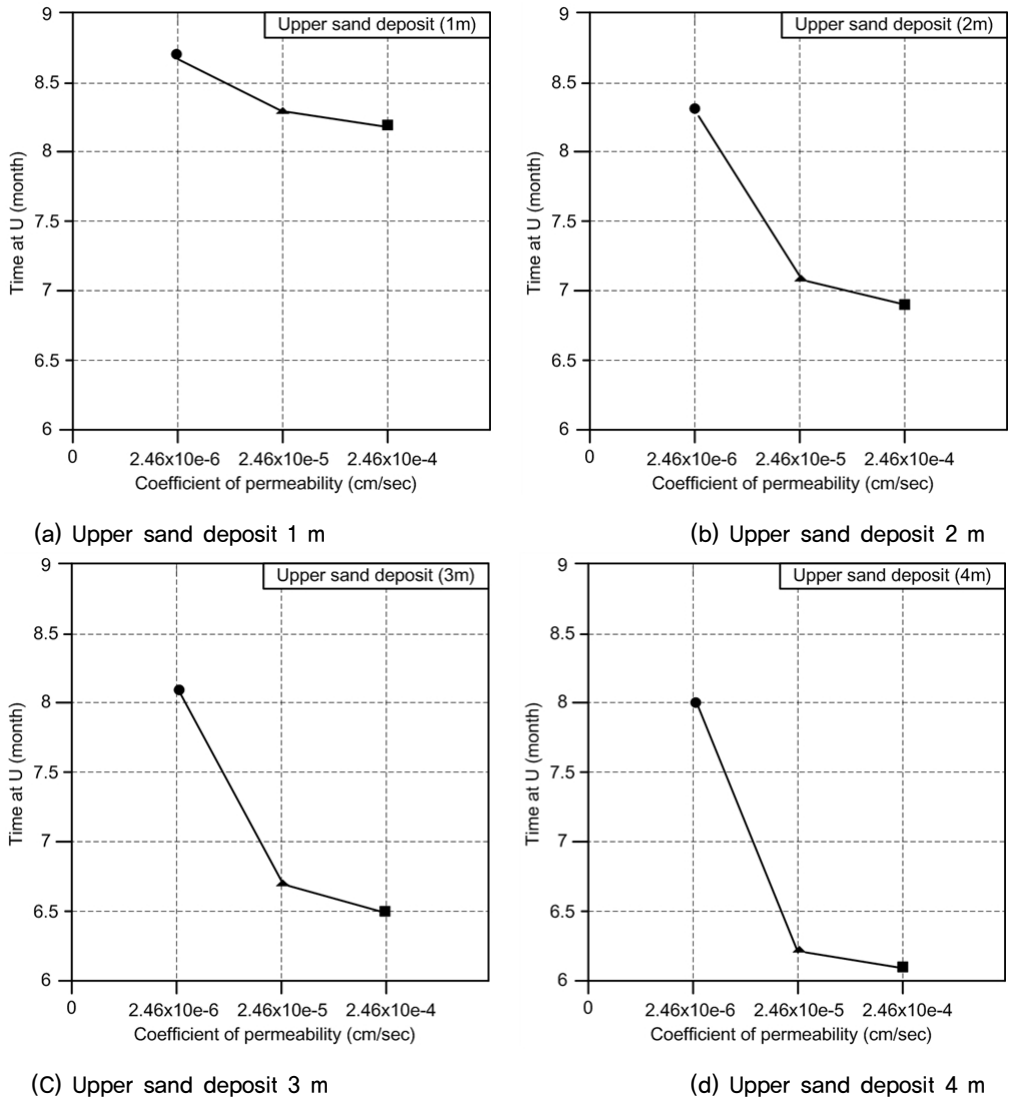


Fig. 10. Comparison of 90% degree of consolidation of clay with different sand deposit thicknesses and permeability

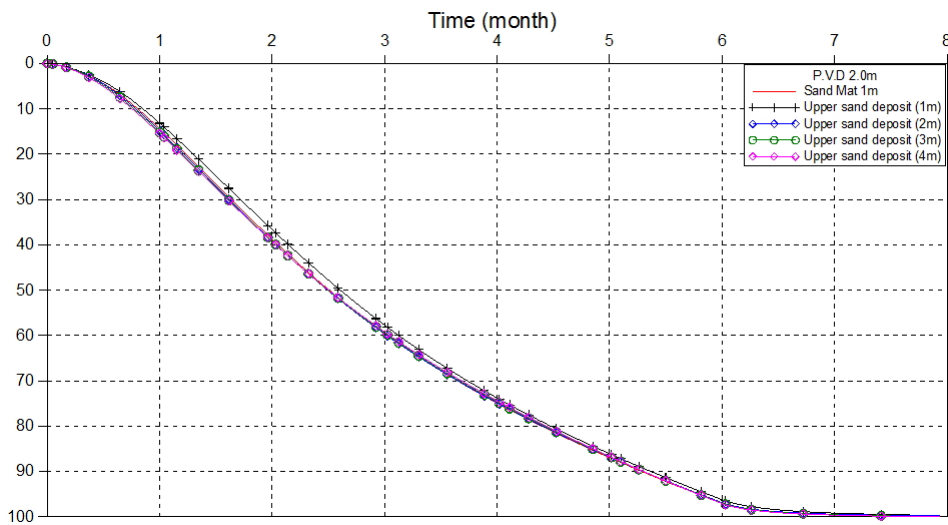


Fig. 11. Average degree of consolidation of clay with permeability $k = 2.46 \times 10^{-5}$ (cm/sec) of upper sand deposit and PVD installation space 2 m

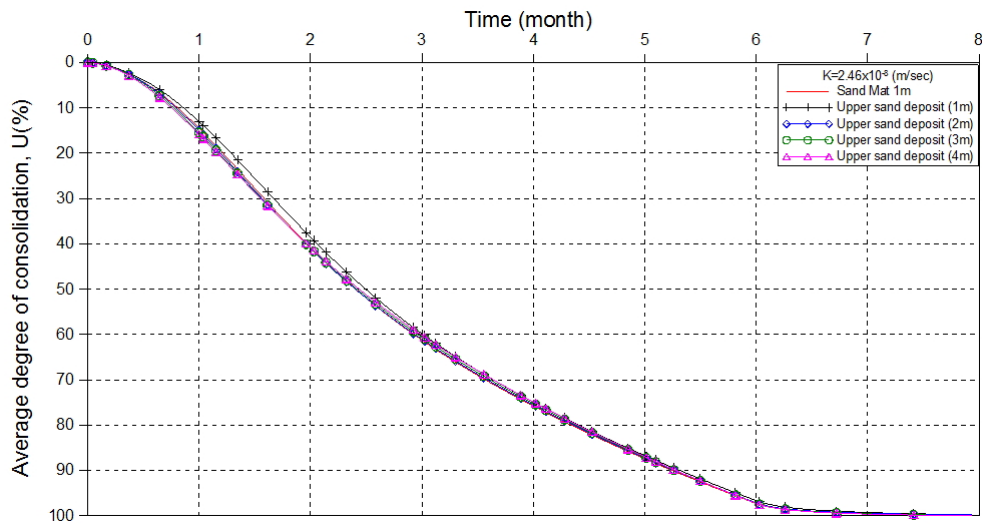


Fig. 12. Average degree of consolidation of clay with permeability $k = 2.46 \times 10^{-6}$ (cm/sec) of upper sand deposit and PVD installation space 2 m

수평배수재로서의 기준에 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

- (2) 투수시험결과 수평배수재로서의 투수계수 기준인 1×10^{-3} cm/sec 이상을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.
- (3) 상부퇴적사질토의 두께가 2m 이상이 되면 샌드매트 포설 경우보다 더 빠른 시간 내에 압밀이 완료되는 것으로 나타나 델타지역 상부퇴적사질토층은 수평배수재로서의 기능을 수행할 수 있다고 판단된다.
- (4) PVD를 시공했을 때 전체적인 압밀 완료 시점이 PVD를 시공하지 않은 경우보다 빨라지는 것으로 나타났으며, PVD가 설치된 경우 샌드매트의 유무 및 퇴적사질토층의 두께에 상관없이 압밀완료 시점은 유사한 것으로 나타났다. 즉 상부퇴적사질토층이 존재하는 지역에 PVD를 설치하면 샌드매트를 포설한 경우와 같이 압밀 효과가 크게 개선된다고 볼 수 있다.
- (5) $k = 2.46 \times 10^{-5}$ (cm/sec)인 경우에는 $k = 2.46 \times 10^{-4}$ (cm/sec)인 경우에 비하여 압밀이 지연되는 거동을 보이거나 퇴적사질토층의 두께가 2m 이상이면 샌드매트의 기능을 할 수 있음을 알 수 있다. 반면 $k = 2.46 \times 10^{-6}$ (cm/sec)일 때는 퇴적사질토의 두께에 상관없이 수평배수재로서의 기능을 할 수 없는 것으로 해석되었다.

Acknowledgement

This work has been supported by K-Water Resource Corporation under the grant of "Consolidation behavior of soft ground and application of prefabricated vertical

drain to artesian pressure and discharge capacity".

References

1. 김상규, 김윤태, 김재홍 (2014), "대심도 연약지반 연직배수재 설계시 고려사항", *한국지반공학회지*, 제30권, 제5호, pp.15-24.
2. Bak, K. J. (1998), *Effect of Depositional Environments on Engineering Characteristics of Marine Deposits in the Nakdong River Mouth and its Neighboring Coast*, Ph.D Thesis, Dongguk University.
3. Biot, M. A. (1941), "General Theory of Three-dimensional Consolidation", *Journal of Applied Physics*, Vol.12, No.2, pp.155-164.
4. Busan Metropolitan Corporation. (2016), http://www.bmc.busan.kr/projects/industry_01_24/.
5. Chung, S. G. Lee, N. K. Lee, J. M. Min, S. C., and 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.2, pp.47-61.
6. Kang, C. G. (2011). *Unsaturated permeability Characteristics of silty sand on the Nakdong River*, Master Thesis, Kyungpook National University.
7. Kim, B. J., Kim, J. H., Jung, J. Y., Kwon, J. K., and Kim, T. H. (2016a), "Characteristics of Sedimented Sandy in Nakdong River Delta", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.15, No.2, pp.25-33.
8. Kim, J. H. Kim, T. H. Kwon, J. K. Kim, B. J. Jeong, and J. Y. (2015), "Study on the Physical and Mechanical Properties of Sandy Soil in the Nakdong River Delta Area", *Proc. of KSCE 2015 CONVENTION 2015 CIVIL EXPO & CONFERENCE*, Gunsan, pp.1-2.

9. Kim, J. H., Kwon, J. K., Jung, J. Y., Hwang, W. K., and Kim, T. H. (2016b), "An Experimental Study on the Applicability of Upper Sand Deposit in the Nakdong River Delta as Horizontal Drains", *Proc. of the Fall Conference of Korean Geosynthetics Society*, Gyeonggi pp.89-90.
10. Kim, S. W., Lee, S. W., Lee, J. W., Jo, K. Y., Kim, Y. T., and Kim, J. S. (2006), "Depositional Environments and Sequence Stratigraphy of estuary of the Nakdong River", *Proc. of the Spring Conference of Korean Geotechnical Society*, pp.882-887.
11. Kim, Y. K. (2008), *Estimation of Sandmat Thickness Considering Settlement of Soft Ground*, Master Thesis, Chonju University, pp.57.
12. Korea Water Resource Corporation (K-water) (2014). *Soil Investigation Report of Busan Eco-Delta City Section 3*. pp.38.
13. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), *Korean Construction Specification - KCS 11 30 15 : 2016*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
14. Nam, K. H. (1995), *Behavior Analysis of the Foundation Improved with Pack drain using Modified Cam-Clay Model*, Master Thesis, Chonnam National University, pp.91.