

# 수직배수를 병행한 진공압밀공법 적용시의 연약지반 거동 예측 연구

A Study on the Performance of Vacuum Preloading with Vertical Drains

박 중 배\*<sup>1</sup>

Bark, Joong Bae

이 승 우\*<sup>1</sup>

Lee, Seung Woo

김 유 석\*<sup>2</sup>

Kim, You-Seok

---

## Abstract

In this study, prediction of soil behavior under vacuum preloading with vertical drain is explored on the basis of numerical models and the results were compared with field measurements. Reasonable prediction of the time rate of settlements and pore pressure dissipation under vacuum preloading is the major concern. The conventional method for vacuum preloading is based on modeling vacuum preloading as surcharge loading for the consolidation analysis. However, this modeling may violate the real behavior of soils under vacuum loading since the total stress in the analysis varies due to the modeled surcharge loading whereas in-situ total stress of soils under vacuum loading is constant. In this study a new method is suggested. Instead of modeling vacuum loading as surcharge loading, negative hydraulic head is applied at the surface drain boundary to simulate the vacuum preloading. Comparisons of predictions and field measurements of soil behavior under vacuum preloading are presented and the usefulness of the new modeling technique is demonstrated.

## 요 지

진공압밀공법은 성토재하압밀공법과는 달리 성토재료가 불필요하며, 급격한 재하에 의한 전단 파괴에 대한 위험이 없다는 공법원리상의 장점을 지니고 있으나, 시공상의 어려움으로 국내외적으로 활발하게 적용되지는 않았다. 그러나 최근들어 진공막 설치기술 및 강력한 진공펌프등의 등장으로 시공기술이 발전되면서 진공압밀공법은 미국, 유럽, 일본등지에서 적극적으로 활용되기 시작했고, 국내에서도 광양, 김해등지의 연약지반에 개량공법으로 적용된바 있다. 일반적으로

---

\*<sup>1</sup> 정회원, (주) 대우건설기술연구소 선임연구원

\*<sup>2</sup> (주) 대우건설기술연구소 주임연구원

진공에 의한 부압을 가상성토하중으로 환산하고 이를 압밀이론에 적용하여 진공압밀시의 지반 거동을 예측하고 있다. 그러나 진공압을 가상성토하중으로 모델링할 경우 진공압밀공법적용시 지반내 전응력변화없이 유효응력만이 증가하는 현상을 적절히 모델링 할 수 없다. 즉 진공압에 대한 가상성토하중 모델링은 지반거동에 중요한 영향을 미치는 응력경로를 실제와는 달리 고려하게 된다. 진공압 가상성토하중 모델링(model 1)의 적합성을 검토하기 위하여, 김해지역의 하수처리장 부지조성을 위하여 진공압밀공법이 적용된 지반에 대한 예측을 수행하였다. 일반적으로 Model 1은 진공압밀하에서의 지반침하에 대하여서는 합리적으로 예측할 수 있으나 진공부압을 가상성토하중으로 가정하기 때문에 과잉간극수압의 크기 및 소산양상을 예측하는데는 적용할 수 없다는 단점이 있다. 본 연구에서는 진공압밀하에서의 실제와 같이 지반의 응력경로를 고려할 수 있도록, 진공에 의한 부압을 지표면 수압의 경계치로서 모델링(model 2)하는 해석기법을 제안하였다. 현장계측치와 비교결과, Model 2는 압밀침하량 및 침하시간뿐 아니라 과잉간극수압의 크기 및 소산양상 등 진공압밀하에서의 실 지반거동이 매우 유사하게 예측되었다.

Keywords : Vertical Drain, Vacuum, Negative Hydraulic Head

## 1. 서론

진공압밀공법은 연약점토층을 진공압으로 탈수시켜서 압밀을 촉진시키는 연약지반 개량 공법으로 일반적으로 압밀속도를 촉진시키기 위하여 수직배수공법과 병행되고 있다. 그림 1은 진공압밀공법의 개요도이다. 진공압밀공법의 시공상의 주요사항은 진공부압을 유지하는 것으로 이를 위하여 일반적으로 모래층위에 air-tight membrane 을 설치한다. 진공압을 가하게 되면 그림 2에서와 같이 지반내의 전응력의 변화없이 수압이 감소하게 되므로 유효

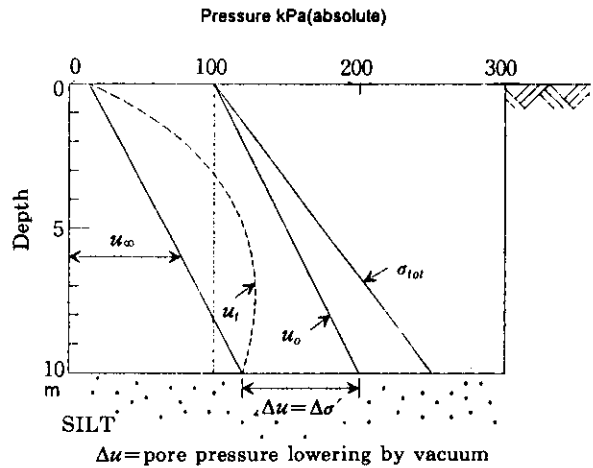


그림 2. 진공압밀공법의 원리

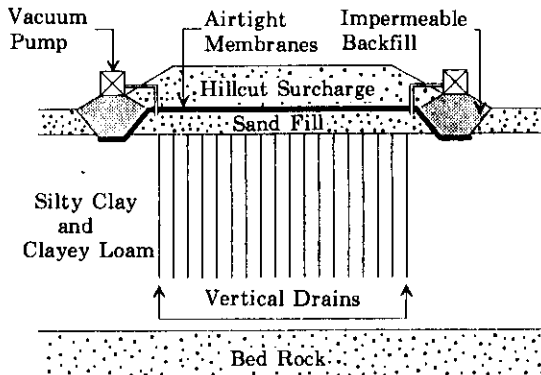


그림 1. 진공압밀공법의 시공개요도

응력이 증가하게 된다. 이와 함께 토립자 사이의 물은 수직배수재를 통하여 지표쪽으로 배수되게 되어 지반의 침하가 발생하게 된다. 성토재하압밀공법이 재하하중에 대한 압밀현상을 통하여 유효응력을 증가시키는데 비하여 진공압밀공법은 간극수압을 감소시켜서 유효응력을 증가시킨다.

성토재하압밀공법 및 진공압밀공법하에서의 지반내 응력경로는 그림 3과 같다.  $K_0$  상태에 있는 지반내에 성토재하압밀공법을 적용하게

되면 지반내 임의요소는 성토기간중에는 축차 응력의 증가와 더불어 간극수압이 증가하게 되어 유효응력이 감소하게 된다(응력경로 A-B). 성토완료후 방치하게 되면, 과잉간극수압이 소산되면서 등방압밀이 진행되어 응력경로 B-C를 따르게 된다. 반면에 진공압밀하에서는 전응력 변화없이 진공부압에 의하여 수압만이 감소하게 되므로 유효응력이 각 방향으로 일정하게 증가하게 되므로 등방압밀현상이 발생하여 응력경로 A-E를 따르게 된다. 그림3에서 보면 성토재하압밀공법과 진공압밀공법은 상이한 응력경로를 통하여 압밀현상을 발생시키고 있다. 성토재하압밀공법의 경우 성토재하시 지반내 흡요소 의 응력경로 A-B는 전단 파괴선을 향하기 때문에 지반의 활동파괴를 방지하기 위해서는 단계별 성토등을 통하여 성토재하속도를 조정해야 한다. 반면에 진공압밀공법하에서의 진공부압이 작용하면 지반내 흡요소의 응력경로는 성토재하압밀공법의 경우와 달리 전단파괴선  $K_r$ 와 멀어지기 때문에 지반의 활동파괴에 대한 우려가 없다.

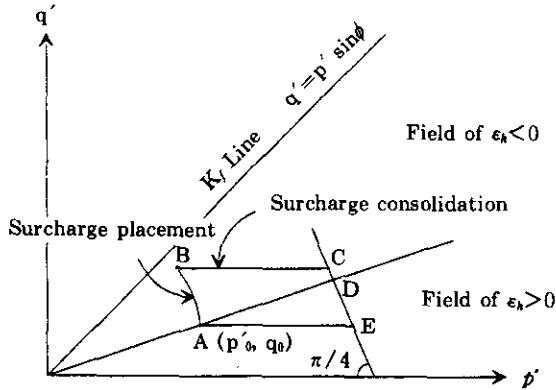


그림 3. 성토재하압밀과 진공압밀의 응력경로

## 2. 진공압밀공법에 대한 해석모델

### 2.1 진공압 모델링

일반적으로 진공압밀공법시의 지반거동 예측을 위하여서는 진공에 의한 부압을 가상성토하

중으로 환산하고 이를 압밀이론에 적용하여 지반거동을 예측하고 있다. 즉 성토재하압밀공법에 대한 해석과 동일한 해석모델을 활용하고 단지 진공압을 가상성토하중으로 모델링(model 1) 한다. Model 1의 경우 진공압밀공법 적용시 지반내 전응력 변화없이 유효응력만이 증가하는 현상을 적절히 모델링 할 수 없기 때문에 예측된 수압의 형태 및 소산과정이 진공압밀공법 적용시에 발생하는 수압의 형태 및 소산과정(그림 2 참조)과는 상이하게 된다.

시공관리측면에서 보면 간극수압의 측정은 계획된 진공압이 지반내 작용하고 있는지 검토할 수 있는 중요한 계측항목이다. Model 1의 경우는 간극수압에 대하여 진공압밀공법 적용시와는 상이한 거동을 예측하기 때문에 예측결과와 계측된 간극수압을 비교하며 시공관리하는데 무리가 있다. 본 연구에서는 진공압밀하에서의 실제와 같이 지반의 응력경로를 고려할 수 있도록, 진공에 의한 부압을 지표면 수압의 경계치로서 모델링(model 2)하는 해석기법을 제안하였다. Model 1과 Model 2의 진공압에 대한 개념도는 그림 4, 5 와 같다.

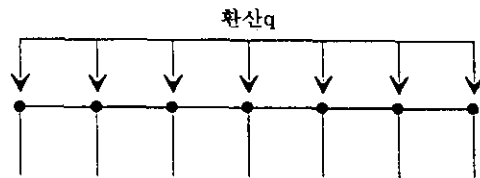


그림 4. Model 1의 개념도

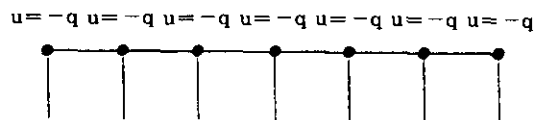


그림 5. Model 2의 개념도

## 2.2 수직배수재를 포함한 지반의 평면변형률 해석

본 연구에서는 김해하수처리장 Screen동 지반의 진공압밀하에서의 거동을 예측하기 위하여 Crisp Program 를 해석도구로 이용하였다. 대상지반 및 수직배수재를 그림 6과 같이 평면변형률 조건상에서 3,720개의 6절점 LST(linear strain triangle)로 유한요소망을 구성하였다. 이 때 해석대상의 경계조건은 좌우측 경계부는 수평방향변위 고정, 불투수층이며, 바닥경계는 수직방향변위 고정, 불투수층으로 하였다. 단 Smearred Zone의 반경은 Hansbo (1981)의 제안대로 수직배수재 간격의 2배로 가정하였다.

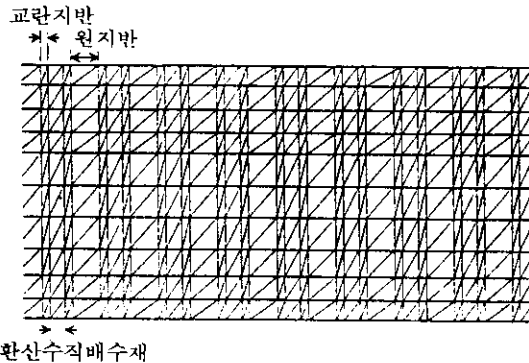


그림 6. 대상지반 및 수직배수재의 FEM Mesh

실제지반의 3차원적인 압밀거동을 그림7과 같이 평면변형률 조건상에서 합리적으로 수치모델링하기 위하여서는 등가의 해석모델을 작성하여야 한다. 즉 압밀과정중에서 실제 지반의 압밀도와 해석모델에서의 압밀도가 일치하여야 하고 교란효과 (smearred effect) 및 배수정효과를 적절히 고려할 수 있어야 한다. Shinsha(1982), Chung(1991)등은 축대칭 조건에서의 50% 압밀도와 2차원 및 1차원모델에서의 50% 압밀도를 동일한 시간에 달성하는데 필요한 등가투수계수를 제안하였다. 이승래 (1995)등은 해석자가 원하는 임의시간에서 실제 지반의 압밀도와 해석모델에서의 압밀도가

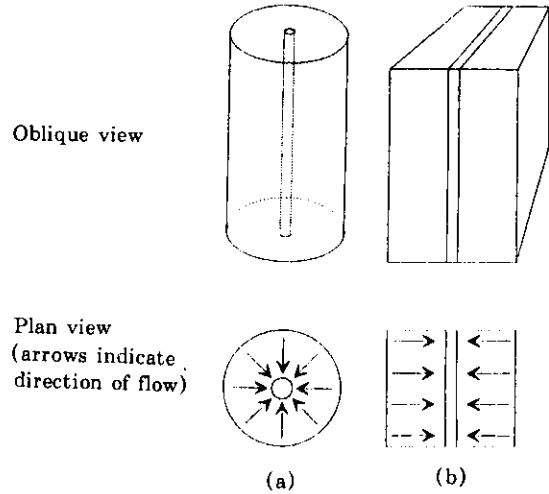


그림 7. Unit Cell (a) 축대칭, (b) 평면변형률

일치하는 기법을 개발하였다.

Hird(1995)등은 축대칭조건과 평면변형률 조건에서 50% 압밀도가 일치하며 교란효과 및 배수정효과를 고려할 수 있는 방안을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{B}{R} = \left\{ \left( \frac{3}{2} \right) \left[ \text{Ln} \left( \frac{R}{\gamma_s} \right) + \left( \frac{K}{K_s} \right) \text{Ln} \left( \frac{\gamma_s}{r_w} \right) - \left( \frac{3}{4} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

B : 평면변형률 셀의 폭의 반

R : 축대칭 셀의 반경

K : 수평투수계수

$K_s$  : Smearred zone의 수평투수계수

$\gamma_s$  : 수직배수재의 반경

$\gamma_s$  : Smearred zone의 반경

식(1)은 그림7의 (a), (b)의 임의의 깊이에서 동일한 평균 압밀도를 유지하게 하는 평면변형률 조건과 축대칭 조건에서의 등가 관계식이다. 또한 배수저항(Well Resistance)을 고려하기 위해서는 식(2)를 만족시켜야 한다.

$$\frac{Q_w}{q_w} = \frac{2B}{\pi R^2} \quad (2)$$

$Q_w$  : 평면변형률 조건에서의 배수재의 배수능

$q_w$  : 축대칭 조건에서 배수재의 배수능

즉 수직배수재를 포함한 축대칭조건에서의 압밀현상을 평면변형률 조건에서 합리적으로 모델링하기 위해서는 식 (1),(2)를 각각 독립적으로 동시에 만족시켜야 한다. 따라서 식 (2)를 만족시키는 B값을 구하여 식(1)을 축대칭과 평면변형률조건에서의 투수계수비로 정리한 식 (3)에 대입하면 축대칭 조건에 대한 평면변형률조건에서 등가투수계수를 구할 수 있다.

$$\frac{K_{pl}}{K_{ar}} = \frac{2B^2}{3R^2 \left[ \ln\left(\frac{R}{\gamma_s}\right) + \left(\frac{K_{ar}}{K_s}\right) + \ln\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w}\right) - \left(\frac{3}{4}\right) \right]} \quad (3)$$

### 3. 사례연구

본 연구의 대상현장은 개량대상 면적이 73, 420m<sup>2</sup>으로, 국내에서 적용된 진공압밀공법으로는 최대규모이다. 프랑스메나드에서 제작한

투수성이 양호한 부직포로 둘러싸인 PVC 원형 주름관을 수직배수재로 사용하였으며, 수직재 타설시 발생 가능한 교란영역(Smeared Zone)의 영향을 줄이기 위하여 수직배수재를 정적으로 관입하였으며 진공막과 원지반의 완벽한 기밀유지를 위한 특수 시공기술이 적용되었다.

#### 3.1 사례연구대상의 지반조건 및 시공개요도

본 연구에서 검토대상은 하수처리장중 Screen동이 건설될 지역으로 지층의 지질도 및 시공개요도는 각각 그림 8, 9와 같다.

실제 Screen동 지반 및 수직배수재에서의 3차원적인 압밀거동을 그림 9와 같은 평면변형률 조건상에 수치 모델링하기 위하여서 Hird (1995)가 제안한 식 (2), (3)를 이용하여 수직배수 간격 및 투수계수를 표 1과 같이 보정하였다.

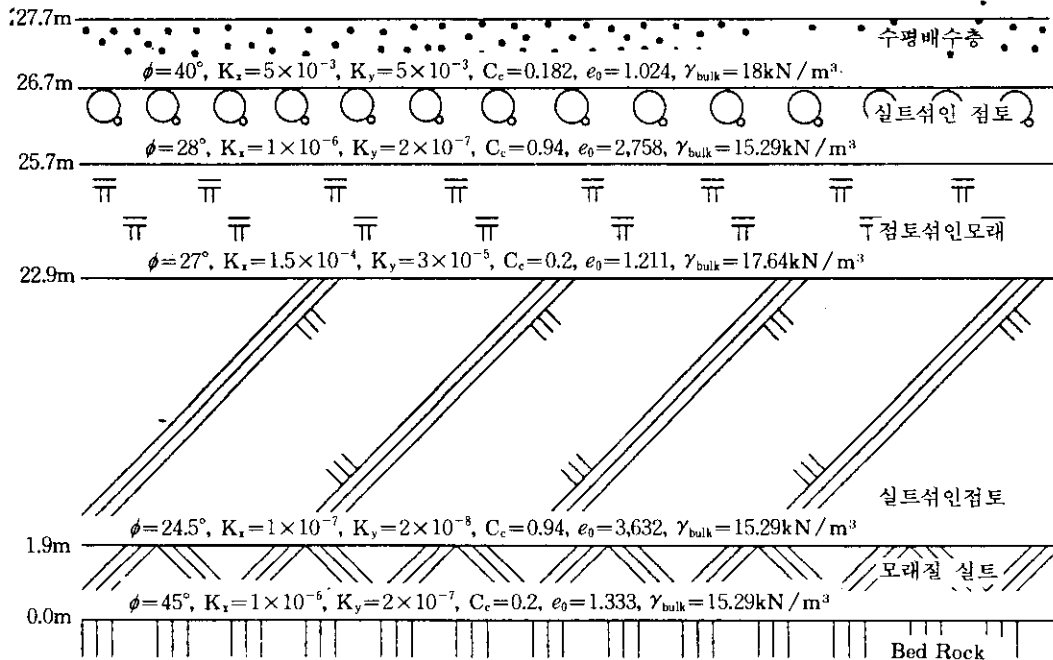


그림 8. Screen동 지반의 지질도

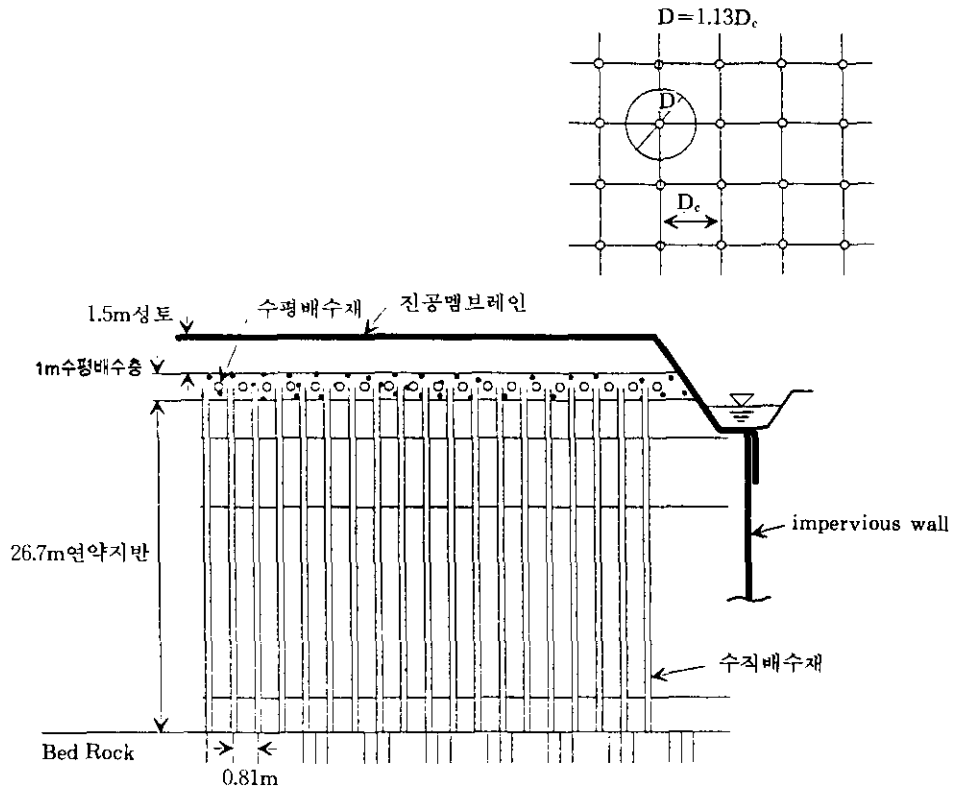


그림 9. 시공개요도

표 1. Screen동 지반 수직배수 간격 및 투수계수 보정

	실제 치수	보정후
수직배수재간격	0.81m	0.33143m
불교란지반(cm/sec) $K_x(25.7\sim 26.7)$	$1 \times 10^{-6}$	$6.99 \times 10^{-8}$
불교란지반(cm/sec) $K_x(22.9\sim 25.7)$	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.39 \times 10^{-8}$
불교란지반(cm/sec) $K_x(1.9\sim 22.9)$	$1 \times 10^{-7}$	$1.05 \times 10^{-7}$
불교란지반(cm/sec) $K_x(0\sim 1.9)$	$1 \times 10^{-6}$	$2.09 \times 10^{-6}$
교란지반( $K_x(=K_y)$ ) (25.7~26.7)	$2 \times 10^{-7}$	$6.99 \times 10^{-9}$
교란지반( $K_x(=K_y)$ ) (22.9~25.7)	$3 \times 10^{-5}$	$1.39 \times 10^{-9}$
교란지반( $K_x(=K_y)$ ) (1.9~22.9)	$2 \times 10^{-8}$	$6.99 \times 10^{-8}$
교란지반( $K_x(=K_y)$ ) (0~1.9)	$2 \times 10^{-7}$	$1.39 \times 10^{-8}$

해석상에 적용된 Modified Cam Clay Parameter 등 지반 물성의 입력치는 김해시 하수 종말처리장 설치공사 기초지반에 대한 사전토질조사결과 보고서(1995)을 토대로 하여 표 2

와 같이 구하였다. 시공공정은 표3과 같이 단순화하여 시공단계별로 수치해석상에서 반영하였다. 현장계측에 대한 요약은 표 4와 같다.

표 2. Modified Cam Clay Parameters

Layer No.	0	1	2	3	4
Thickness(m)	1.0	1.0	2.8	21	1.9
$C_c$	0.28	0.94	0.2	0.94	0
$\lambda$	0.08	0.409	0.087	0.409	0.087
$\kappa$	0.016	0.018	0.0174	0.0818	0.0174
$\phi$	40	28~29	27	24.5	45
N치		4	0	0	50타/17cm
$K_{11}$	0.357	0.531	0.546	0.585	0.293
$e_{11}$	1.0	2.215	1.03	2.215	0.98
$e_{cs}$	1.3	2.814	1.230	3.711	1.316
$M \left( = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \right)$	2.017	1.287	1.165	1.070	2.017
Poisson Ratio	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$\gamma_w$ KN/m <sup>3</sup>	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
$\gamma_{bulk}$ KN/m <sup>3</sup>	18.0	15.29	17.64	15.29	15.29
원지반 $k_x$ (cm/sec)	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-6}$
환산 $k_x$		$6.99 \times 10^{-8}$	$1.05 \times 10^{-5}$	$6.88 \times 10^{-9}$	$6.99 \times 10^{-8}$
환산 $k_y$ (=교란 $k_x k_y$ )		$139 \times 10^{-8}$	$2.09 \times 10^{-6}$	$1.39 \times 10^{-9}$	$1.39 \times 10^{-8}$

표 3. 시공공정

시공단계	누적일수	내 용
1	1~ 6	1차성토(수평배수재)
2	7~ 14	방치기간
3	15~ 42	수직배수재 타설(1.15m 간격)
4	43~205	방치기간
5	206~215	수직배수재타설(0.81m 간격)
6	216~226	2차 성토
7	227~262	방 치
8	263~	진공압밀시작(2주후 0.7BAR 도달)

표 4. 계측내용

계측항목	위 치	계측기간
침 하 량	스크린동 중앙부	95.6. 1~
간극수압	스크린동 중앙부 (-1.5m)	96.1.16~
간극수압	스크린동 중앙부 (-16m)	96.1.16~
간극수압	스크린동 중앙부 (-24m)	96.1.16~

### 3.2 지반거동 예측 및 분석

표 3의 1,2차 성토재하하중은 해석상에서 등가의 등분포하중으로 고려하였으며 진공압에 대하여서는 Model 1에서는 가상성토하중으로 Model 2에서는 지표수압의 경계치로서 모델링 하였다.

#### 3.2.1 침하

지표 침하곡선에 대한 계측 및 해석결과는 그림 10.에 보여지고 있다. 1차 성토재하압밀(1일~215일)에 대한 최종침하량은 해석치와 계측치가 거의 일치하나 침하속도는 상당한 차이가 있다. 이 기간중 해석의 침하속도가 계측보다 빠른 이유는 실제 수직배수재 간격이 1.15m 인데 비하여, 해석시는 1차 성토완료후 추가 시공된 수직배수재까지 유한요소망상에 입력되어서 수직배수재 간격이 실제보다 작은 0.81m로 고려되기 때문인 것으로 판단된다. 2차 성토재하 압밀기간중에(216일~262일)는 계측

과 해석의 침하곡선이 거의 일치하고 있다. 진공압밀기간(263일이후) 에서는 Model 1 및 2, 두 방법 모두 실제 계측 침하곡선에 매우 가깝게 침하를 예측하고 있다. 단 Model 2는 Model 1에 비하여 5% 정도 작은 침하량을 예측하는데, 이는 Model 1이 가상 재하과정중에 비등방 응력증가가 생기는데 비하여 Model 2는 지표부에 등방응력증가만이 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

수직배수가 없는 지반의 압밀침하해석에 있어서는 본 경우와 같이 침하량이 대변위라 하면 합리적 해석을 위해서는 압밀중의 유효배수길이의 변화를 고려할 수 있는 유한 변형률 이론 등의 적용이 필요하나, 본 경우와 같이 수직배수재를 포함한 지반에서는 유효배수길이가 배수재의 수평간격에 의해서 결정되기 때문에 대변위에 대한 특별한 고려 없이도 합리적 압밀 해석이 가능하다고 판단된다.

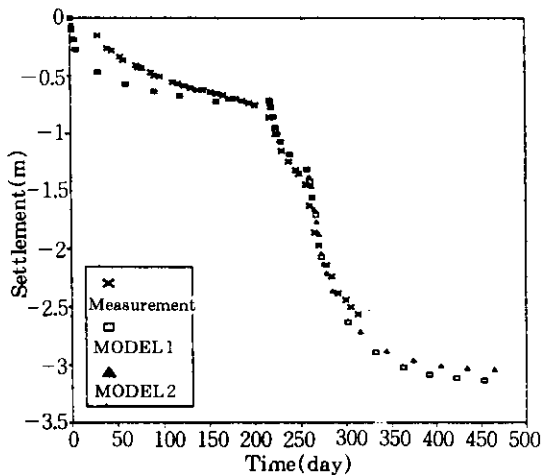


그림 10. 지표침하에 대한 계측 및 해석치

### 3.2.2 간극수압

그림 11, 12, 13은 지표로부터 깊이 1.5, 16, 24m 깊이의 불교란 지반에서의 과잉간극수압에 대한 계측치 및 Model 2의 해석결과를 보이고 있다. Model 1의 경우 진공압밀하에서는 과잉간극수압 예측자체가 실제 거동과 판이

하게 달라서 과잉간극수압 예측에는 활용되지 않기 때문에 비교대상에서 제외하였다. 과잉간극수압에 대한 계측은 피에조미터를 2차성토 완료후에 설치하여 진공압밀공법 적용후부터 실시하였다. 진공막위의 추가성토로 인한 피조미터 기능이 망실되기전까지의 과잉간극수압의 계측치 변화를 살펴보면, 진공압이 작동함에 따라 과잉간극수압이 급격하게 감소되다가 압밀이 완료됨에 따라 안정화되고 있음을 알 수 있다. 그림 11, 12, 13.에 나타낸 바와 같이 깊이

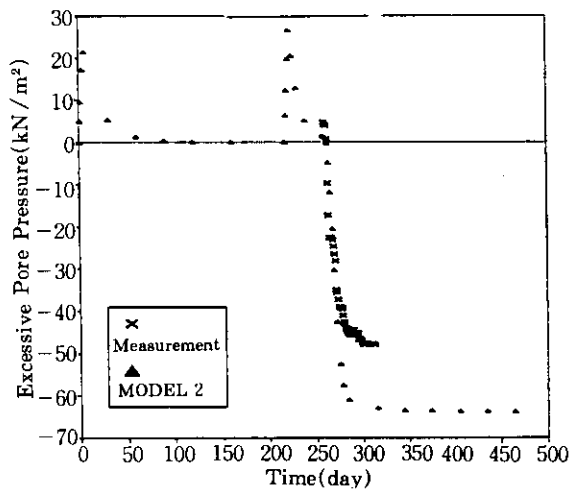


그림 11. 1.5meter 깊이의 지반에서 과잉간극수의 변화

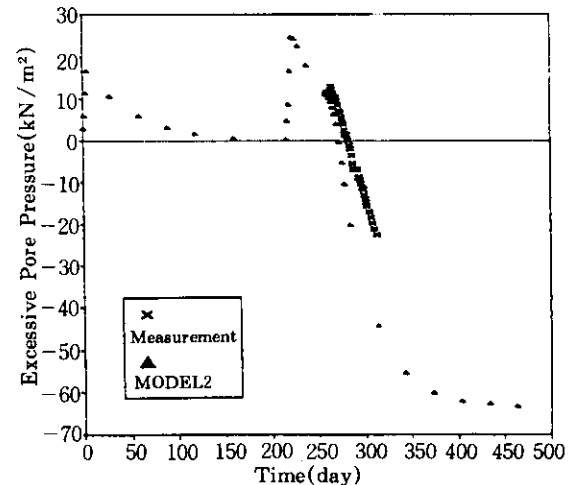


그림 12. 16meter 깊이의 지반에서 과잉간극수의 변화



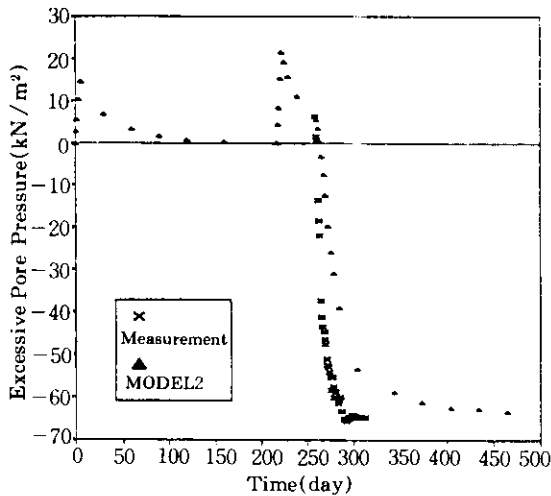


그림 13. 24meter 깊이의 지반에서 과잉간극수압의 변화

24m에서의 과잉간극수압의 계측치와 진공부압을 지표수압의 경계치로 고려한 Model 2의 해석치에 대하여 시간경과별 과잉간극수압 곡선을 비교한 결과, Model 2는 진공압밀하에서의 과잉간극수압에 대하여 실제거동에 매우 근접하게 예측하고 있다고 판단된다.

#### 4. 결론

진공압밀시의 지반거동 예측을 위하여서 일반적으로 활용되고 있는 진공압에 대한 가상성토하중 모델링기법(model 1)에 대하여 검토하였다. 가상성토하중 모델링기법은 침하에 대하여서는 합리적인 예측이 가능하지만 진공압밀시 지반내 선응력 변화없이 유효응력만이 증가하는 현상을 적절히 모델링 할 수 없기 때문에 진공압밀시의 간극수압의 크기 및 소산양상 등을 합리적으로 예측할 수 없어서 간극수압 계측관리에 있어서 시공기준치를 제공하지 못한다는 단점이 있다.

본 연구에서는 진공압밀하에서의 실제지반의 응력경로를 고려할 수 있는 진공압에 대한

지표 수압 경계치 모델링(model 2)을 제안하였다. 사례연구를 통하여 현장계측치와 비교한 결과 지표 수압 경계치 모델링(model 2)은 압밀 침하량 및 침하시간뿐 아니라 과잉간극수압의 크기 및 소산양상 등 진공압밀하에서의 실 지반 거동을 매우 근접하게 예측할 수 있다는 것이 검증되었다.

#### 감사의 글

본 연구에 사용된 계측자료를 준비해주신 대우 김해하수처리현장 장 봉천 소장님, 윤 정남 과장님께 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. (주) 대우, (1995), "김해시 하수종말처리장 설 치공사 기초지반에 대한 사전토질조사 결과 보고서"
2. Gunn, M. J. & Britto, A. M. (1990), "User's and programmer's guide," Engineering Department of Cambridge University
3. Hansbo, S., Jamiolkowski, M. & Kok, L. (1981), "Consolidation by Vertical Drains," Geotechnique 31, pp 45-66
4. Sinsha, H., Hara, H., Abe, T. & Tanaka, A. (1982), "Consolidation Settlement and Lateral Displacement of Soft Ground Improved by Sand Drains," Tsuchiro-kiso, JSSMFE, Vol. 30 No.2, pp 7-12
5. 김 윤태, 이 승래, 도 남영, 이 영남 (1994), "배수재가 설치된 지반의 효율적인 압밀해석 및 역해석," 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp 175-181
6. Hird, C. C., Pyrah I.C., Russel, D. & Cinicioglu, F. (1995), "Modelling the effects of vertical drains in two-dimensional finite element analyses of embankments on soft ground," Can. Geotech. J. 32, pp 795-807

(접수일자 1996. 3. 25)