

## Suction 연직배수 공법과 PDB 공법의 변위거동 차이에 대한 유한 요소 해석 Finite element analysis for the difference of displacement behavior developed from suction drain method and vertical drain method

김기년<sup>1)</sup>, Ki-Nyeon Kim, 안동욱<sup>2)</sup>, Dong-Wook Ahan 한상재<sup>3)</sup>, Sang-Jae Han,  
정승용<sup>4)</sup>, Seung-Yong Jung, 김수삼<sup>5)</sup>, Soo-Sam Kim

- 1) 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Univ. of Hanyang (kkn1976@ihanyang.ac.kr)
- 2) 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Univ. of Hanyang
- 3) 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Univ. of Hanyang
- 4) 지구환경전문가그룹 대표이사, President, Expert Group for Earth and Environment Co. Ltd
- 5) 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Hanyang

**SYNOPSIS** : In this study, an aspect of settlement, developed from different ground improvement method like suction drain method using vacuum pressure and vertical drain method using overburden pressure, was compared each other. In order to analyze settlement tendency of each method exactly, the finite element analysis program was used. The analyses of vertical settlement and lateral displacement for suction drain method and vertical drain method were conducted independently during the solving stage. The initial condition of drainage zone was fixed with 25m depth and 21m width. After the program analyses, the settlement condition had a different tendency with the ground improvement method. Especially, in the results of vertical drain method, the disparity of settlement between the middle of improved zone and unimproved zone. In the case of suction drain method, however, the difference of settlement was smaller than that of vertical drain method.

**Key words** : Suction drain method, Vacuum pressure, Finite element analysis, Plastic drian board

### 1. 서 론

대규모의 연약지반을 처리하고자 할 때, 일반적인 선행 압밀 재하 공법의 경우(Pre-Loading 공법) 상당량의 토사와 시간이 필요하다. 또한 토사확보에 따른 환경파괴는 상당히 곤란한 문제로 작용할 수 있다. 연직배수공법은 지반 내에 투수층 재료를 연직으로 타설하고, 점성토층의 배수거리를 짧게 하여 압밀침하를 촉진시켜 단기간 내에 지반을 개량하는 공법으로 현재까지 많이 사용되고 있는 압밀촉진공법이다. 그러나 연직배수의 효과는 재하압력에 따라 발휘되기 때문에 성토재하가 반드시 필요하며, 이는 토사확보 및 부등침하문제, 부분재하를 받는 기초지반에서의 재하면 단부 부근 연약층에 큰 전단응력이 유발되는 문제, 재하와 동시에 현저한 형상변형을 일으켜 효과적인 압밀이 발생하지 않는 문제, 장기간

존치 등 여러 가지 문제점을 야기한다. 또한 시공깊이는 일반적으로 20m정도가 한도이기 때문에 그 이상이 되면 시공이 곤란해지고 공비도 급격히 증가한다.

따라서 기존 압밀축진공법의 단점을 보완하고 공기를 줄이기 위해 1952년 스웨덴의 Kjellman에 의해 진공압밀(대기압재하) 공법이 제안되었다. 그러나 이 공법은 진공유지를 위해 사용되는 기밀시트가 고가이고 잦은 파손이 발생하며, 대규모 부지에 적용할 경우 복잡한 배수파이프의 연결로 공사에 상당한 어려움이 수반될 뿐만 아니라, 진공펌프의 장시간 가동에 의한 펌프의 효율감소 등 여러 가지 문제점을 가지고 있다. 또한 이론적으로 sealing이 충분히 유지되었을 때, 적용 진공압 대비 약 60~75% 정도의 효율만이 유지된다(Cortlever, 2002). 따라서 앞서 제시한 기존의 공법들 보다 지반개량효과가 탁월하고 대심도 지반에도 적용이 가능하며, 시공이 용이한 공법의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 대심도 연약지반을 목적에 맞게 개선하기 위한 방법으로 성토하중 및 기밀시트 등이 필요치 않은 석션드레인(Suction Drain) 공법의 적용성을 유한요소프로그램을 통해 검증하고자 하였다. 또한 기존의 연직배수공법과의 변위거동에 대한 차이점을 비교하여 두 공법간의 연약 지반 개량 메커니즘을 구분하고자 하였으며, 진공석션압 대비 연직배수공법의 성토하중을 비교하여 개량효과를 정량적으로 검토하고자 하였다.

## 2. 공법의 원리

그림 1에는 하중 재하공법과 석션드레인공법의 응력변화를 비교하여 나타내었다. 연직배수공법은 재하된 하중으로 인해 발현된 과잉간극수압의 소산을 통해 압밀이 진행되는 원리를 이용한 공법인 반면, 석션드레인공법은 지반 내 연직배수재를 타입하고 직접 진공을 가하게 되면 전응력이 일정한 상태에서 간극수가 배출되며 유효응력이 증가하게 되어 압밀이 진행되는 원리를 이용한 공법이다. 그림 2에는 석션드레인 공법의 현장 적용 모식도를 나타내었다. 이 공법은 성토하중이나 기밀 시트 없이 진공압만을 이용하여 지반을 개량하기 때문에 기존의 성토재하공법과 진공압밀공법의 단점들을 동시에 극복할 수 있다. 또한 배수재와 진공펌프를 직접 연결하고 배수재가 타입되는 깊이를 조절하여 sealing 층의 두께를 자유자재로 조절할 수 있기 때문에, 진공효율을 극대화 시킬 수 있고 균일한 진공압을 지반에 적용시킬 수 있으며, 이로 인해 지반 내 부등침하 및 전단 파괴를 방지할 수 있다. 그림 3에는 기존 제시된 압밀축진공법의 시공 단계 및 이로 인해 유발되는 여러 가지 문제점을 나타내었다.

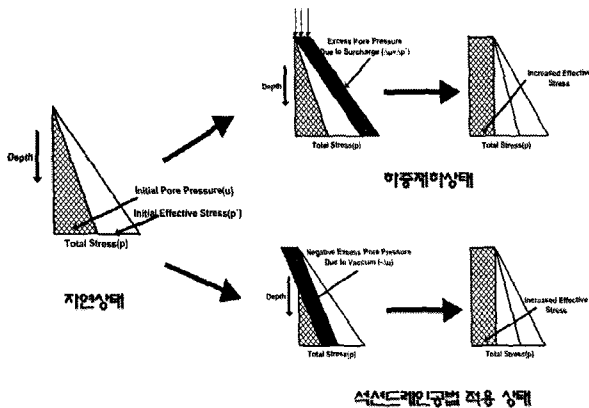


그림 1. 연직배수공법과 석션드레인공법의 비교

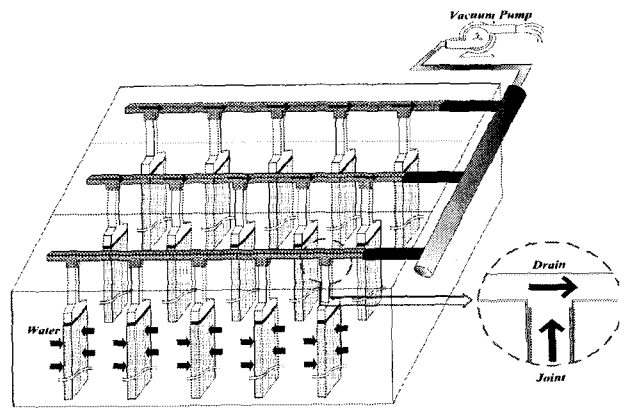


그림 2. 석션드레인 기술의 현장 적용 개념도

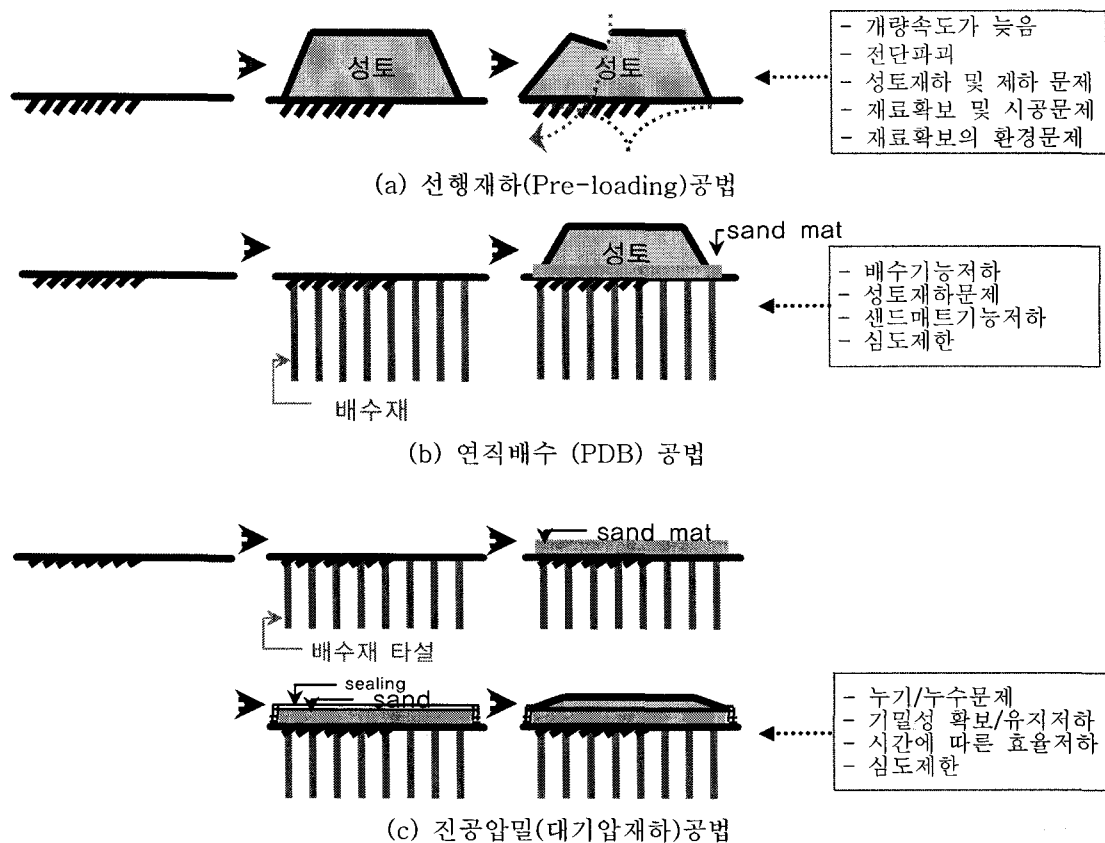


그림 3. 기존에 제시된 압밀촉진공법의 공정 및 이에 따른 단점

### 3. 영향인자 분석을 위한 유한요소 해석

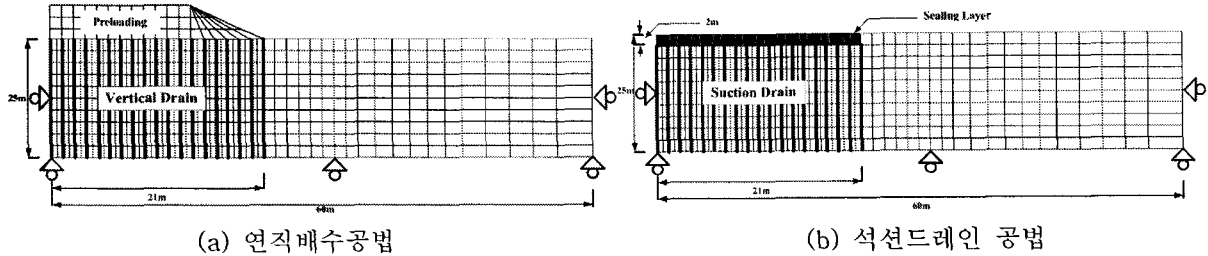
본 논문에서는 석션드레인 공법의 침하 양상을 연직배수공법과 비교분석하기 위한 수치해석을 수행함에 있어서 필요한 매개변수들을 실측치(한국토지공사, 1999)를 바탕으로 표 1과 2와 같이 가정하였다. 개량층의 해석 시 수정 Cam-Clay 모델을 사용하였으며, 성토층의 경우 등방 탄성모델을 사용하였다. 지반조건은 연직배수공법의 경우 배수재가 타입 되는 압축지반의 두께를 25m로 설정하였고, 석션드레인 공법의 경우는 개량층의 두께를 23m, sealing을 위한 지층을 2m로 설정하였다. 또한 지하수위는 지표면에 위치하는 것으로 가정하였으며, 압축지반의 저면은 불투수층으로 가정하여 일면배수만을 허용하였다. 더불어 배수재는 1.5m 간격의 사각형 배치로 간주하였으며, 배수재의 등가경은 5cm(박, 1994)로 하였다. 그림 4에는 두 공법의 영향인자 분석을 위해 구성한 유한 요소망을 도시하였다. 연직배수공법의 경우(그림 4(a)), 성토높이를 2.0, 4.0, 6.0m로 변화시키며, 각 단계 별로 30일간의 압밀해석을 실시하였다. 또한 최종 단계 성토 후 300일간의 압밀해석을 실시하였다. 석션드레인 공법의 경우(그림 4(b)), 진공압 조건(-0.2, -0.4, -0.6, -0.8kg/cm<sup>2</sup>)을 구현하기 위해 각 배수재의 상부에 인위적으로 진공압을 가하고 각 단계별로 30일간의 압밀해석을 실시하였다. 또한 최종 진공압 적용 후 200일간의 압밀해석을 실시하고, 공법 종료 시 진공압의 제거에 따른 거동을 파악하기 위해 진공압 제거 후 50일간의 해석을 별도로 실시하였다.

표 1. Clay 지반에 적용한 수정 Cam-Clay 매개 변수

$\kappa$	$\lambda$	$e_{cs}$	M	$v'$	$\gamma_{bulk}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	투수계수(cm/sec)
0.0264	0.226	2.094	1.022	0.3	16.859	9.81	$1.248 \times 10^{-6}$

표 2. 성토 지반에 적용한 Elastic 매개 변수

$E(\text{kN/m}^2)$	$\nu'$	$\gamma_{\text{bulk}}(\text{kN/m}^3)$	$\gamma_w(\text{kN/m}^3)$
20000	0.3	19.6	9.81



(a) 연직배수공법

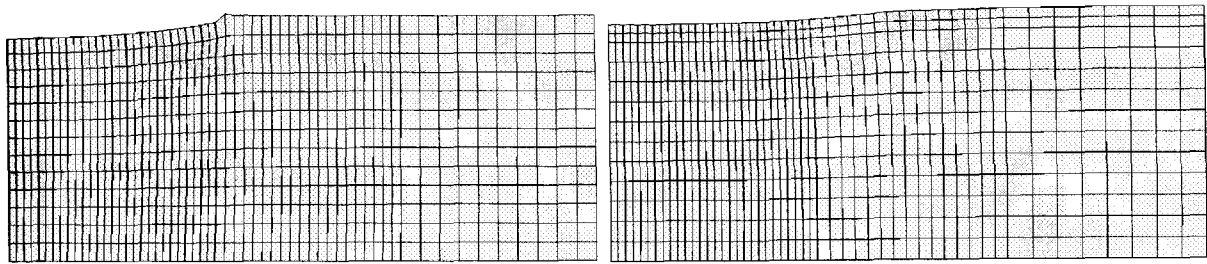
(b) 석션드레인 공법

그림 4. 유한요소망 및 경계조건(해석단면)

## 4. 해석결과 및 분석

### 4.1 연직변위거동

그림 5는 연직배수공법의 최종성토 300일 이후의 변형요소망과 석션드레인 공법의 최종단계 진공압 적용 200일 이후의 변형요소망을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 연직배수공법의 경우, 성토체 중앙부분에서 과도한 침하가 발생하고 있으며, 모서리 방향으로 갈수록 침하량이 점점 감소함을 알 수 있다. 또한 성토체 외곽에서는 약간의 융기현상이 지표 및 지중에서 발생하고 있다. 석션드레인 공법의 경우, 개량부분 전단면에서 비교적 고른 침하양상이 나타났으며, 개량부분 외곽에서도 연직방향의 침하가 발생했음을 알 수 있다.

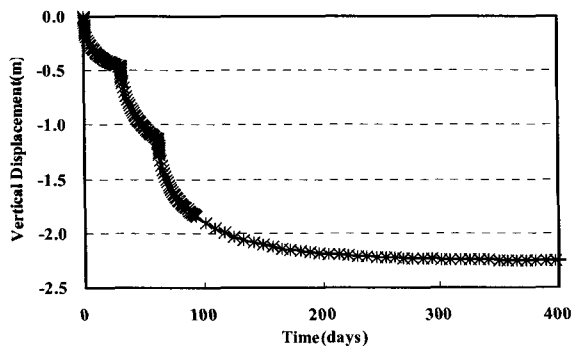


(a) 연직배수공법

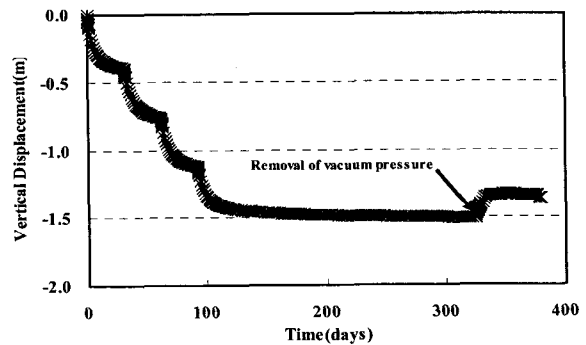
(b) 석션드레인공법

그림 5. 압밀종료 후 각 공법 별 변형요소망

그림 6(a)에는 개량영역 중앙부에서 30일 간격으로 성토고를 2.0m 씩 증가 시키며 최종 6.0m가 될 때까지 단계 성토를 진행시켜 발생된 연직배수공법의 침하양상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 성토고가 증가함에 따라 침하량은 증가하였다.



(a) 연직배수공법



(b) 석션드레인공법

그림 6. 적용된 진공압과 단계 성토에 의해 발생된 연직변위 거동

그림 6(b)에는 개량영역 중앙부에서 진공압을  $-0.2\text{kg/cm}^2$ 에서  $-0.8\text{kg/cm}^2$ 까지  $-0.2\text{kg/cm}^2$ 의 간격으로 변화시켜 발생된 석션드레인 공법의 침하양상을 나타내었다. 또한 진공압 제거 후 50일간 발생된 침하결과를 함께 나타내었다. 그 결과 적용 진공압이 커질수록 침하량은 점점 크게 발생하였고 진공압 크기에 거의 비례하여 증가하는 경향이 나타났으며, 연직배수공법의 성토고 증가에 따라 발생한 침하양상과 비슷한 경향을 나타냈다. 석션드레인 공법 종료 후 약 0.2m의 지반 융기가 발생했는데, 이는 진공압의 제거로 인해 발생한 급격한 과잉간극수압 증가에 기인한다. 그림 7에는 성토 단계별로 발생된 지반의 전단면 침하양상을 나타내었다. 성토고가 증가함에 따라 성토층 아래에서의 압밀 침하량은 증가하고, 성토층 끝단에서의 융기량 역시 증가하는 양상을 띠었다. 이는 성토체 끝단에서 유발된 지중 내 측방변위에 기인한다.

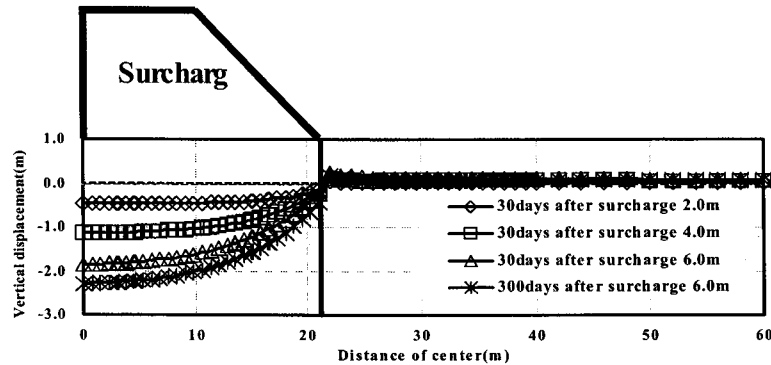


그림 7. 전단면 침하형상(연직배수공법)

그림 8~11에는 각 진공압( $-0.2$ ,  $-0.4$ ,  $-0.6$ ,  $-0.8\text{kg/cm}^2$ ) 조건에서 시간 증가에 따라 발생된 전단면 침하양상을 나타내었다. 모든 진공압 조건에서 약 15일이 경과되면, 각 조건 별로 일정한 값으로 수렴되는 침하거동이 나타났으며, 진공압이 증가함에 따라 전단면 침하량은 크게 나타났다. 또한 연직배수공법과는 달리 미개량영역에서도 침하가 발생했다.

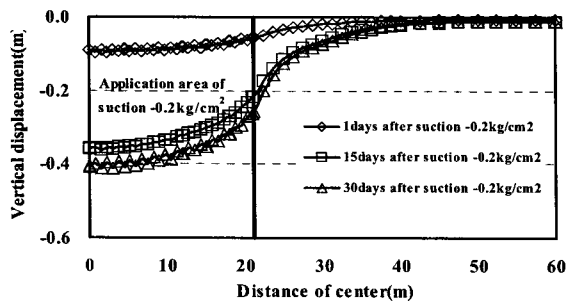


그림 8. 전단면 침하형상(진공압  $-0.2\text{kg/cm}^2$ )

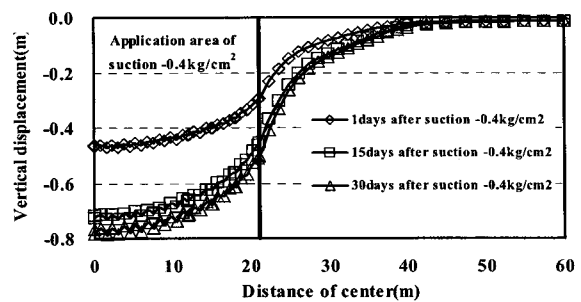


그림 9. 전단면 침하형상(진공압  $-0.4\text{kg/cm}^2$ )

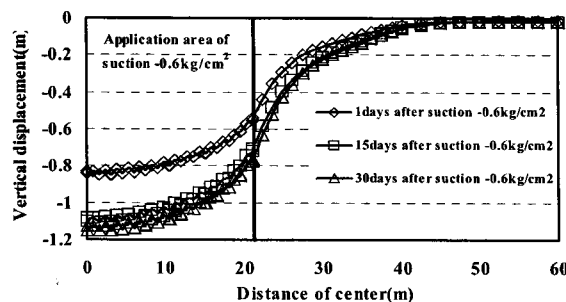


그림 10. 전단면 침하형상(진공압  $-0.6\text{kg/cm}^2$ )

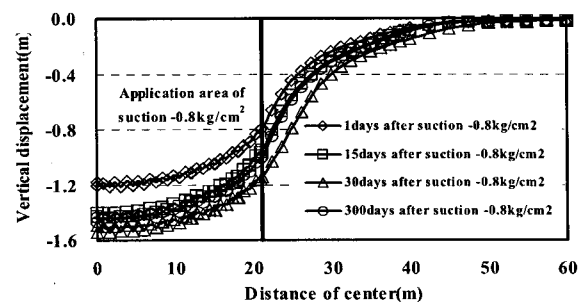


그림 11. 전단면 침하형상(진공압  $-0.8\text{kg/cm}^2$ )

그림 12에는 연직배수공법과 석션드레인공법에서 성토고 2.0m, 6.0m와 진공압  $-0.2$ ,  $-0.8\text{kg/cm}^2$  일 때의 전단면 침하양상을 비교하여 나타내었다. 두 공법을 비교해 보면, 성토고 2.0m와 진공압  $-0.2\text{kg/cm}^2$ 의 개량영역 중앙부와 끝단에서의 최종 침하량은 유사한 거동을 나타내었다. 그러나 성토고 6.0m와 진공압  $-0.8\text{kg/cm}^2$ 의 경우, 개량영역 중앙부에서는 연직배수공법의 침하량이 더 크게 발생했지만 끝단에서는 반대로 석션드레인공법의 침하량이 더 크게 발생했다. 이는 개량영역 끝단에서의 측방변위가 두 공법 간 서로 반대방향으로 발생했기 때문이다. 또한 PDB 개량영역에서 발생하였던 용기는 Suction Drain 공법에서는 발생하지 않았다. 따라서 이러한 결과를 통해, 석션드레인 공법은 개량영역 끝단에서의 균열을 효과적으로 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

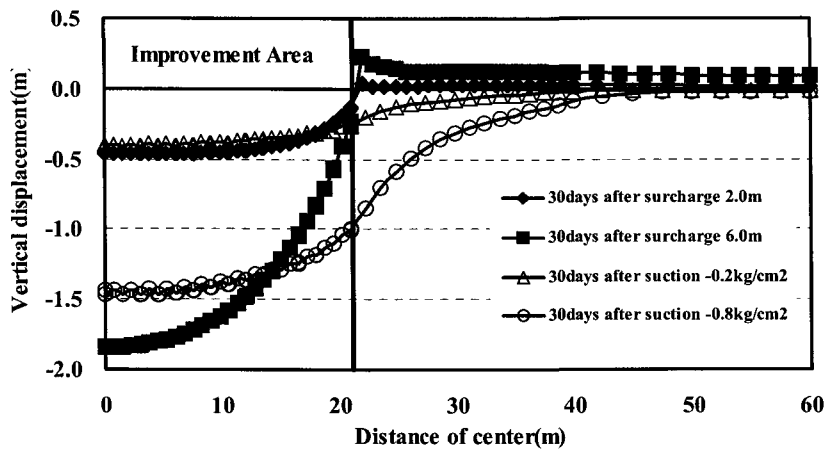


그림 12. 각 공법 별 전단면 침하형상

#### 4.2 수평변위거동

그림 13은 연직배수공법에서 각 하중 재하(2.0~6.0m) 30일 경과 후의 측방변위양상과 각 진공압 별 ( $-0.2\sim-0.8\text{kg/cm}^2$ ) 석션드레인 공법 적용 30일 경과 후의 측방변위 양상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 연직배수공법에서는 선단부 아래 지반의 경우 성토고가 높아짐에 따라 측방변위가 성토체 외곽으로 발생하였다. 그러나 석션드레인공법에서는 개량영역과 미개량영역의 경계부분에서의 수평변위가 개량영역 방향으로 발생했다. 이는 석션드레인 공법으로 인한 응력증가가 지반에 등방적으로 작용했기 때문이다. 또한 연직배수공법에서는 성토고가 높아질수록 석션드레인공법에서는 적용 진공압이 커질수록 변위는 서로 반대방향으로 커짐을 알 수 있다.

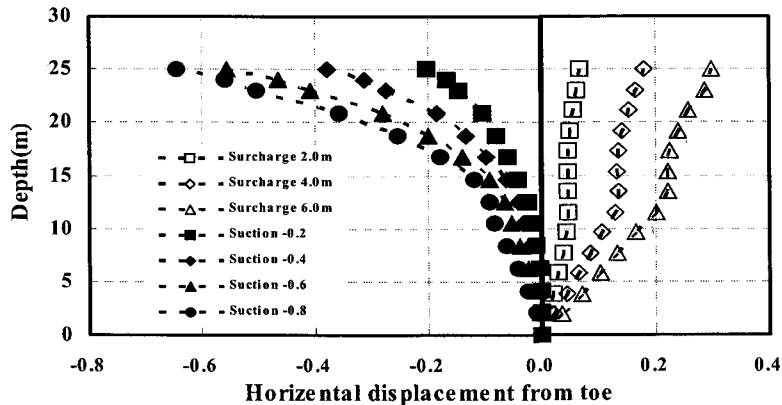


그림 13. 연직배수공법과 석션드레인공법의 지중 내 측방변위

### 4.3 간극수압 거동

그림 14에는 연직배수공법 적용 시 단계 성토로 인해 발생한 과잉간극수압분포를 적용기간에 따라 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 각 단계 별로 성토 중에는 과잉 간극수압이 크게 증가하고 있으며, 성토를 중지하고 방치시키면 비교적 빠른 속도로 과잉간극수압이 소산됨을 알 수 있다. 또한 상부지층과 하부지층의 간극수압은 서로 유사한 경향을 나타내었다.

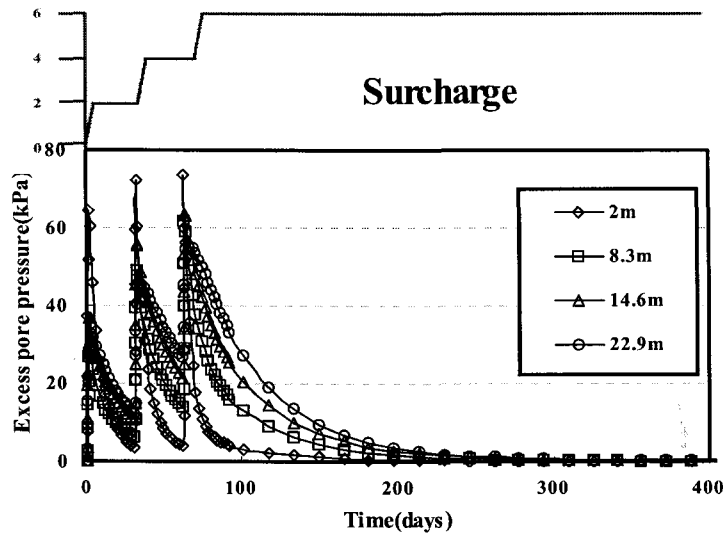


그림 14. 시간-과잉간극수압분포(연직배수공법)

그림 15에는 석션드레인 공법 적용 시, 각 진공압에 따른 과잉간극수압 분포를 나타내었다. 적용 후 5일이 경과되면, 전 깊이에 걸쳐 적용된 진공압이 효율의 저감 없이 대부분 발생됨을 알 수 있다. 또한 심도 2.0m 지점(sealing 층 최하단부)에서 발현된 진공압이 적용된 값과 비교해 거의 100% 발현된 것을 고려해 볼 때, 2.0m의 sealing 층이 진공효율을 유지시키기 위한 충분한 깊이임을 파악할 수 있었다. 모든 조건에서 배수재에 가해진 진공압이 소멸되면서 과잉간극수압이 '0'으로 수렴되었으며 하중제거에 따른 과압밀 팽창거동이 발생했다.

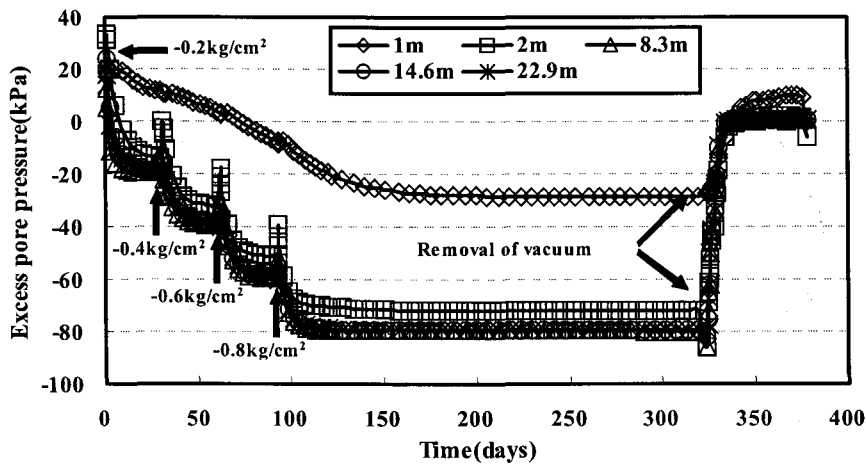


그림 15. 시간-과잉간극수압분포(석션드레인공법)

## 5. 결론

본 연구에서는 석션드레인 공법의 침하거동과 연직배수공법의 침하거동을 유한 요소 해석을 통해 비교분석하였다. 이러한 해석을 통해 발생하는 침하거동을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연직배수공법에서 성토고 증가에 따라 발생한 침하양상과 석션드레인공법에서 진공압을 단계적으로 증가시켜 발생된 침하양상은 비슷한 경향을 나타냈다. 그러나 최종 침하량은 석션드레인 공법을 적용한 경우에서 비교적 작게 나타났는데, 이는 석션드레인 공법을 적용하였을 때 개량영역 끝단에서 발생한 수평변위가 연직배수 공법과 반대 방향으로 나타났기 때문에 이러한 차이가 석션드레인 공법의 침하량을 감소시켰다.
2. 측방변위의 경우, 연직배수공법은 개량영역에서 비개량영역 방향으로 나타난 반면 석션드레인 공법에서는 개량영역 안쪽으로 나타났다. 이는 석션드레인 공법을 적용함에 따라 발현된 응력증가가 지반에 등방적으로 작용하기 때문에 발생하는 현상이다.
3. 연직배수공법 적용 시 각 단계 별로 성토 중에는 과잉 간극수압이 크게 증가하였으며, 성토를 중지하고 방치시키면 비교적 빠른 속도로 과잉간극수압이 소산되었다. 석션드레인 공법의 경우, 과잉간극수압의 분포를 통해 전 깊이에 걸쳐 적용된 부압이 진공효율의 저감 없이 일정하게 발생됨을 알 수 있었다. 또한 약 2.0m의 sealing 층이 각 진공압에서 진공효율을 유지시키기 위한 충분한 깊이임을 파악할 수 있었다. 이후 배수재에 가해진 진공압이 제거되면서 하중제거에 따른 지반의 과압밀 팽창이 발생했다.

## 참고 문헌

1. 박영목(1997), “국내 PBD재의 배수성능과 진공효과에 의한 통수능력 향상에 관한 연구”, 한국지반공학회, 제 13권 2호. pp. 39~53.
2. 박중배, 이승우, 김유석(1996), 수직배수를 병행한 진공압밀(대기압제하)공법 적용시의 연약지반의 거동 예측 연구, 대한지반공학회지, 제12권 제5호, pp. 79~87
3. 제호경(1999), “연직배수재가 부분 관입된 대심도 연약지반에서의 압밀거동”, 동아대학교 석사학위논문, pp.11~17
4. 이승래, 김윤태(1996), “성토재 아래의 연약지반에 설치된 연직배수재의 수치모델링”, 한국지반공학회지, 제12권, 6호, pp.127~138
5. 이주동(2002), “탄소성이론을 이용한 복합지반의 등가특성치 예측”, 명지대학교 석사학위논문, pp.33~36
6. 한국토지공사(1999), 압밀지반의 압밀특성에 관한 연구, pp.761~764
7. 이주형, 이상익, 김영욱, 김병일(2003), “탄소성 이론을 이용한 복합지반의 등가특성치예측”, 한국지반공학회지, 제 19권 2호 pp.179~187
8. Cortlever. NG(2002), “Design manual ; Mebradrain prefab vertical drains”
9. Rick woods & Amir Rahim(2001), “Sage crisp technical reference manual for use with sage-crisp version 4.0”, *The crisp consortium., LTD*