

대심도 연약지반에 적용한 Suction Drain 공법의 수치해석 사례 A Case analysis for Suction Drain method on deep soft ground

김성호¹⁾, Sung-Ho Kim, 한상재²⁾, Sang-Jae Han, 안동욱³⁾, Dong-Wook Ahn, 김병일⁴⁾, Byung-il Kim, 김수삼⁵⁾, Soo-Sam Kim

- 1) 한양대학교 공학대학 토목공학과 석사과정, Master's Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. Hanyang.
- 2) (주)지구환경전문가그룹 기술연구소 소장, Expert Group for Earth and Environment Co. Ltd.
- 3) 한양대학교 공학대학 토목공학과 박사과정, Doctor's Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. Hanyang.
- 4) (주)지구환경전문가그룹 기술연구소 부장, Expert Group for Earth and Environment Co. Ltd.
- 5) 한양대학교 공학대학 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. Hanyang.

SYNOPSIS : Suction Drain Method is soft ground improvement technique, in which a vacuum pressure can be directly applied to the Vertical Drain Board to promote consolidation and strengthening the soft ground. This method does not require a surcharge load, different to embankment or vertical drain method. In this study, Using Suction-CAIN program, which optimize th Suction Drain method, estimate validity Suction Drain method on deep soft ground

Keywords : Suction Drain Method, vacuum pressure, vertical drain method, Suction-CAIN

1. 서론

Suction Drain 공법은 지반에 타설된 연직배수재에 진공압을 직접 가하는 공법으로 전응력이 일정한 상태에서 간극수가 배출되며 유효응력의 증가에 의해 강도가 증가되어 압밀이 촉진되는 원리를 이용한다. 또한 배수재와 진공펌프의 직접적인 연결을 하므로 대심도 연약지반에 적용이 가능하다. Suction Drain 공법은 일반적으로 사용되는 연약지반 개량공법인 성토재하공법 및 연직배수공법과는 달리 성토하중을 필요로 하지 않기 때문에 성토재료의 확보 문제와 지반의 국부적인 전단파괴를 일으키지 않는 이점을 가지고 있다. 또한 기존의 진공압밀공법에서의 문제점인 펌프효율의 감소, 고가의 기밀시트, 그리고 기밀시트의 잦은 파손의 문제를 진공압을 직접적으로 가함으로서 개선시킨 공법이다. 본 연구에서는 Suction Drain 공법을 이용한 대심도 부산 웅동지구 연약지반에 대해 배수재의 깊이에 따라 진공압 감소율이 가능하고 배수재 실제의 지반의 거동과 유사한 해석을 할 수 있는 Suction-CAIN 프로그램(김기년, 2007)을 이용하여 대심도 연약지반에 적용한 Suction Drain 공법의 적용 타당성과 개량에 따른 지반의 거동을 파악하였다.

2. Suction Drain 공법의 원리

연직 배수공법과 석션드레인 공법의 차이는 그림 1에서와 같이 응력의 비교로서 알 수 있다. 연직배수 공법은 재하된 하중에 의하여 발현된 과잉간극수압이 소산되는 과정을 통해 압밀이 진행되는 원리를 이용한다. 반면에 Suction Drain 공법은 지반에 타입된 연직배수재에 직접 진공압을 가하여 전응력이 일정한 상태에서 간극수를 배출시킴으로서 지반의 유효응력이 증가하게 되고 압밀이 진행되는 원리를 이

용한 공법이다. 석션드레인 공법은 기존에 연약지반 개량공법으로 사용되는 성토재하공법과는 다르게 성토하중이 필요하지 않으며, 진공압밀공법과 같이 기밀시트가 필요로 하지 않기 때문에 앞선 공법들의 단점을 동시에 극복할 수 있다. 석션드레인공법은 배수의 타입 깊이를 조절하여 기밀층의 두께를 조절할 수 있으며, 배수재와 진공펌프를 직접 연결함으로써 진공효율을 극대화 시킬 수 있고 일정한 진공압을 지반에 적용시킬 수 있다. 이로 인하여 지반 내 부등침하나 전단 파괴를 방지 할 수 있다. 그림 2는 이러한 석션드레인공법의 개념도를 나타낸 것이다.

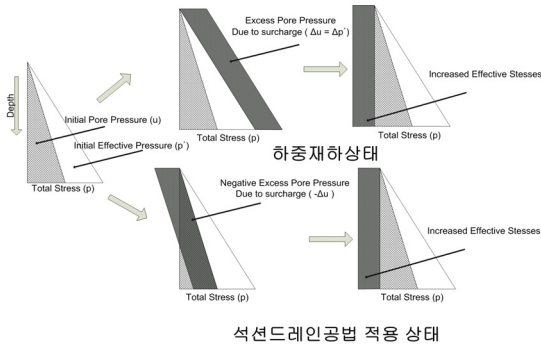


그림 1. 연직배수공법과 석션드레인공법의 비교

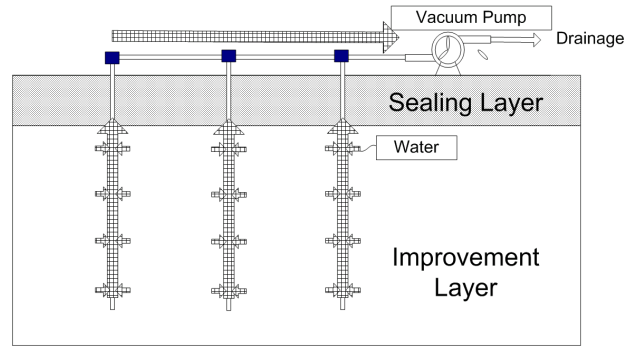


그림 2. 석션드레인 공법의 개념도

3. 대심도 연약지반에 적용된 Suction Drain 공법 해석

3.1 Suction-CAIN

Suctio-CAIN은 Suction Drain 공법을 포함한 연직배수 공법, 성토, 굴착, 진공적용공법에의 해석이 가능하고, 지반의 배수 및 비배수 전단거동, 압밀거동, 배수선 요소를 이용하여 연직배수재를 구현할 수 있는 유한요소 프로그램이다. Sution-CAIN은 복잡한 방사형 압밀 이론을 적용하는데 있어서 실제 지반의 3차원 거동을 2차원 등가모형으로 해석하는데 적절한 평면변형률 해석법(Hird's method, Hird et al.(1992))을 적용하여 해석한다. 프로그램은 크게 전처리모듈과 후처리모듈로 나뉘어 있으며 그 순서도는 그림 3과 같다.

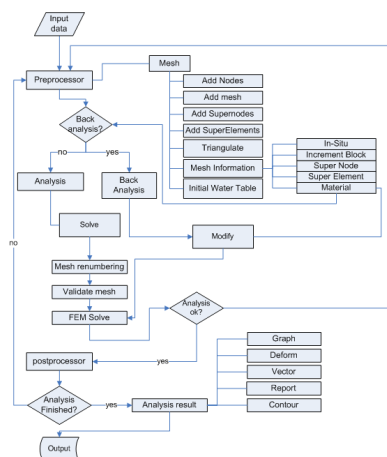
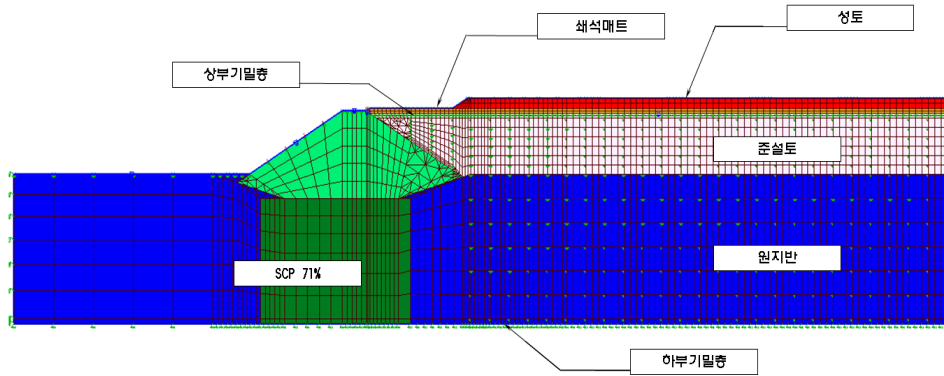


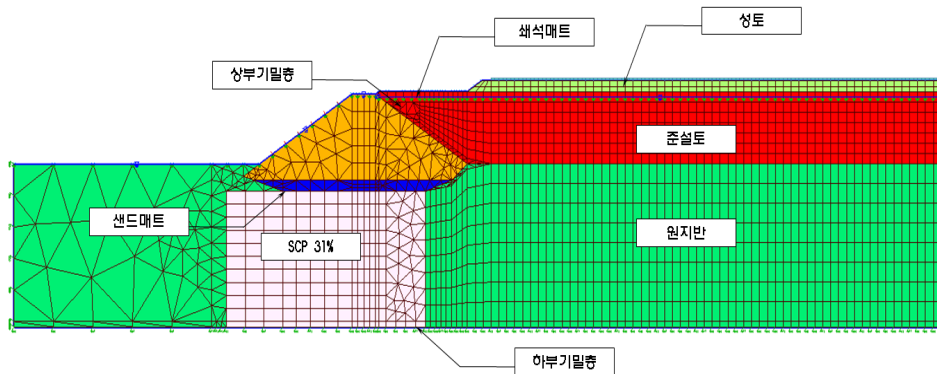
그림 3. Suction-CAIN 프로그램 순서도

3.2 해석 조건

해석 단면은 설계 상부 및 하부 기밀층(Sealing)의 두께는 각각 1.0m이고, 개량층의 두께는 40m이다. 배수재의 배치형상은 1.0m 정사각형 배치로 설정하였으며, 배수재가 타입된 지반의 매개변수는 Hird et al.(1992)의 산정식을 통해 자동으로 입력되었다. 해석 단면은 제체 하부의 보강 조건에 따라 기초준설과 S.C.P 71%로 이뤄진 CASE 1과, 기초준설, 샌드매트, 그리고 SCP 30%로 이뤄진 CASE 2의 두 조건으로 선정하였으며, 각 해석 단면의 지층 구성 및 유한 요소망은 그림 4와 같다.



(a) CASE 1 지층 조건 (SCP 71%)



(b) CASE 2 지층 조건 (SCP 31% + 샌드매트)

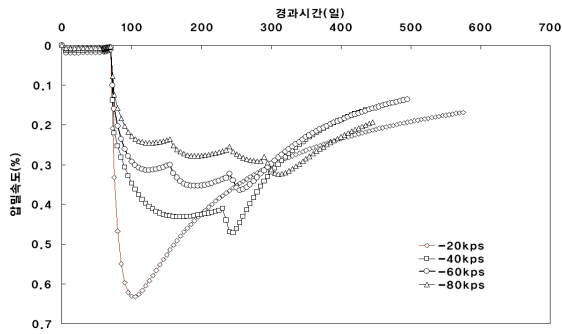
그림 4. 해석 단면

연약지반에 적용된 Suction Drain 공법은 높은 진공압을 배수재를 통하여 지반에 직접 가해짐으로써 배수재 주변의 투수계수가 감소하며 경화되는 Hardening Zone형성과 필터재료의 막힘 현상을 유발한다 이러한 현상은 간극수의 배출이 줄어들게 하여 지반개량의 효율이 크게 감소시킨다(Kim S.S, 2007). 때문에 경화영역을 급격하게 발생 시키지 않고 개량하기 위해서는 단일 진공압을 적용하기보다는 낮은 진공압에서 높은 진공압으로 단계적으로 재하하여야 한다(이상일, 2007). 그러므로 본 연구의 해석에 있어서 적용 진공압은 단계진공압(-0.2 > -0.4 > -0.6 > -0.8 kgf/cm²)을 적용되었다.

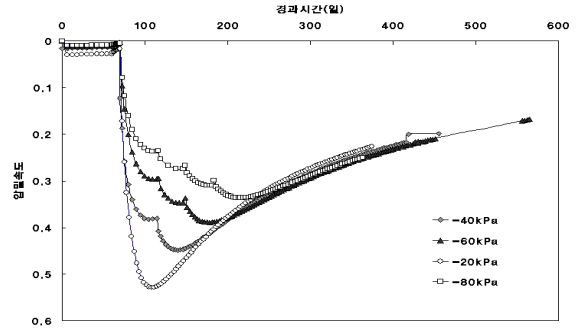
4. 해석 결과

4.1 단계진공압별 적용기간 산정

단계 진공압 적용 기간은 최대 개량심도에 대해 각 단계별 진공압에 따른 압밀도와 시간과의 관계에서 압밀속도를 구하고, 단계진공압 적용을 시작해서 이 압밀속도가 그림 5에서 최대가 되는 지점까지의 기간으로 하였다. 각 단계 진공압 적용 기간은 표 1에서 가압기간과 방치기간의 합이다.



(a) CASE 1



(b) CASE 2

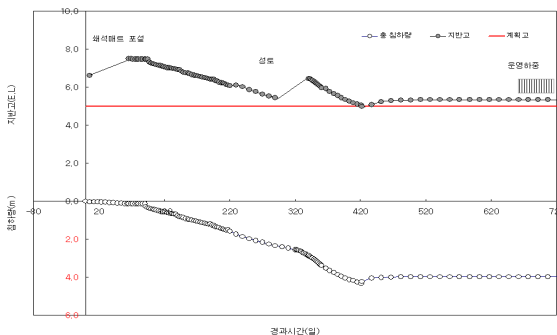
그림 5. 압밀속도와 적용기간

표 1. 단계진공압 적용 기간

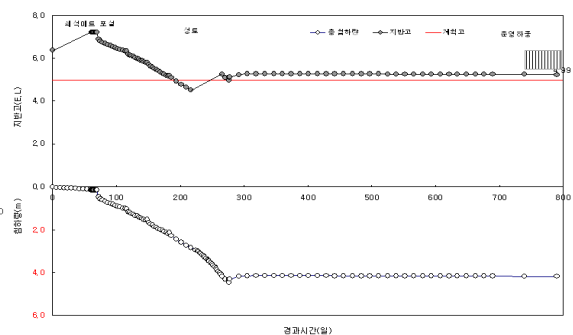
구 분			적용일 (day)	누적일 (day)	적용일 (day)	누적일 (day)
쇄석매트 포설			60	60	60	60
배수재 매설			10	70	10	70
진공압 재하	Suction -20kPa	가압	5	75	5	75
		방치	40	115	39	114
	Suction -40kPa	가압	5	120	5	119
		방치	48	168	27	146
	Suction -60kPa	가압	5	173	5	151
		방치	22	195	30	181
	Suction -80kPa	가압	5	200	5	186
		방치	100	300	39	225
성 토	단계성토 1 (1.0m)	성토	20	320	20	245
		방치	1	321	1	246
	단계성토 2 (1.0m)	성토	20	341	20	266
진공압 및 성토 방치			60	401	10	276
진공압 정지 및 성토 방치			289	690	414	690
운영 하중 재하			600	1290	600	1290

4.2 적용 기간과 침하량

침하량은 개랑기간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 진공압을 정지하였을 때 융기량이 발생하였다가 수렴하는 경향을 보였다(그림 6). 이후 진공압 정지 및 방치기간 이후 운영하중 재하하였을 때의 침하량은 잔류 침하량 10cm 이내였다.



(a) CASE 1

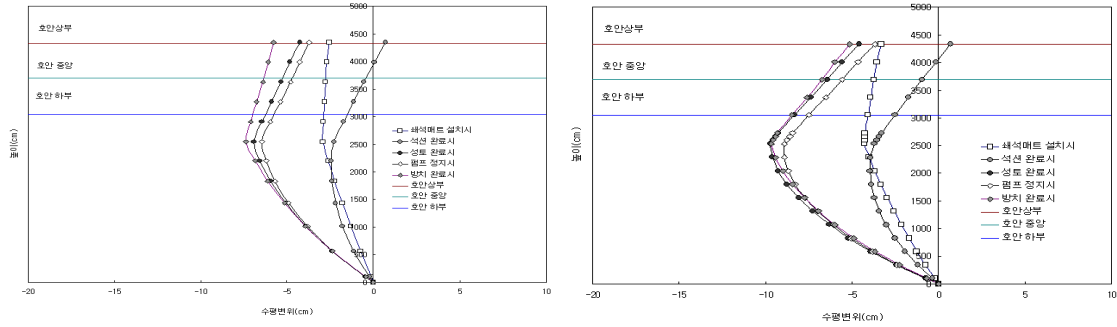


(b) CASE 2

그림 6. 적용기간에 따른 침하량

4.3 수평변위

수평변위는 쇠석매트 포설 후 호안 및 SCP 개량구간에서 외향으로 변위가 발생되며, 진공압 재하 후 내향으로의 변위가 발생하였다. 이후 성토하중에 의해 다시 외향으로 변위가 발생되었다. CASE 1에서 수평 변위는 쇠석 매트 설치에서 방치 완료 기간 동안 최대 수평 변위가 외향으로 약 7.0cm 발생하였다(그림 7(a)). 내향으로의 변위는 진공 재하 완료시 호안상부에 약 0.02cm 발생 하였다. CASE 2에서는 수평 변위가 외향으로 최대 약 4.2cm 발생 하였고(그림 7(b)), 내향으로의 변위는 진공압밀 재하 완료시 호안의 상부에서 약 0.7cm 발생 하였다. 방치완료 후 최종 수평 변위는 약 9.7cm로 나타났다.



(a) CASE 1

(b) CASE 2

그림 7. 수평변위 변화

4.4 간극 수압 분포

과잉간극수압은 그림 8과 같이 쇠석매트를 포설할 때부터 부(-)의 간극 수압이 개량지반에 발생한다. 이후 각 단계 진공압을 적용함에 따라 배수재 주변에서부터 점점 개량지반 전반적으로 과잉간극 수압이 점점 크게 발생하는 양상을 보여주고 있다. 성토 후의 과잉간극수압 분포로 보아 대부분의 간극수압이 소산되어 압밀이 완료되어 감을 알 수 있다.

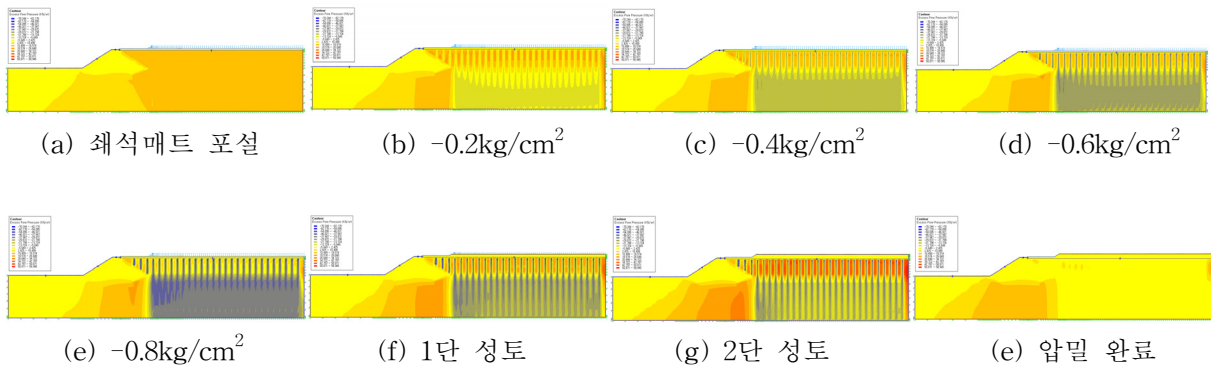


그림 8. CASE 1의 간극수압 변화

4.5 유효 연직응력

유효 연직응력은 두 조건에서 그림 9와 같이 진공압을 제거할 때 까지 증가하는 경향을 보였다. 이후 진공압을 제거하고 개량을 종료하는 시점까지 감소하였다. 방치 완료 후 및 운영하중 재하 시 유효연직응력은 진공재하 제거 직전보다 작게 나타났다.

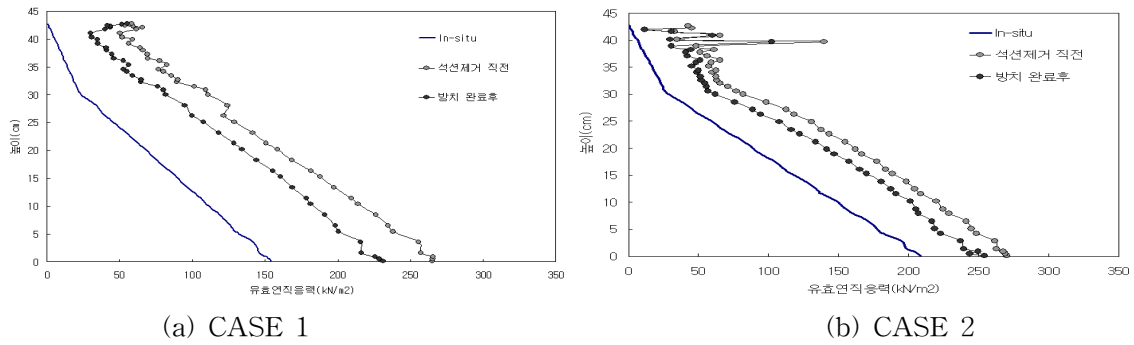


그림 9. 연직 유효응력의 변화

5. 결론

본 연구에서는 대심도 연약지반에 적용한 Suction Drain 공법에 의한 지반의 거동을 예측하기 위해 Suction-CAIN을 이용하여 해석을 하였다. 본 해석을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 압밀 속도에 따른 진공 적용 기간은 압밀속도가 최대가 되는 지점으로 하였고, 총 단계 진공압 적용기간은 CASE 1이 401일, CASE 2가 278일이었다.
2. 침하량은 개랑기간이 지남에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 진공압을 제거하였을 때 융기량이 발생하였다가 일정한 값으로 수렴하였다. 또한 최대 수평 변위는 CASE 1은 약 7.0cm, CASE 2는 약 4.2cm이었다. 진공압을 재하를 완료하였을 때 호안상부에서 내향으로 수평변위가 발생하였다.
3. 과잉간극수압은 진공압을 재하 시 부(-)의 간극 수압이 배수재 주변에서부터 발생하며 각 단계 진공압에 의해 개랑지반에 전반적으로 발생하다가 성토 후 대부분의 간극수압이 소산된 것으로 나타났다
5. 유효연직응력은 진공압을 정지하기까지 지속적으로 증가하다가 정지한 이후 감소하였다. 방치 완료 후 및 운영하중 재하 시 유효연직응력은 진공재하 제거 직전보다 작게 나타났다.

참고문헌

1. 이상일(2007), Suction Drain Method(SDM)에서 진공압 적용기간에 EKfms 개랑효과에 관한 기초적 연구, 한양대학교 대학원 석사학위논문
2. 김기년(2007), “석션보드드레인 공법에서 하드닝 존을 고려한 압밀 침하 해석”, 한양대학교 대학원 박사학위논문
3. Kim, S.S., Han, S.J., Kim, K.N., An, D.W.,(2007), “The Characteristic of Consolidation by Suction Drain Method and Influence of Hardening Zone”, The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference and Exhibition.
4. Hird, C. C., Pyrah, I. C. and Russell, D(1992), “Finite element modeling of vertical drains beneath embankments on soft ground”, Geotechnique, Vol. 42, No. 3, pp 1201-1226