

Suction Drain 공법에서 양방향 압력재하에 의한 효율 평가에 관한 연구 A study on evaluation of duplex loading pressure in Suction Drain Method

안동욱¹⁾, Dong-Wook Ahn, 채광석²⁾, Kwang-Seok Chae, 한상재³⁾, Sang-Jae Han,
윤명석⁴⁾, Myung-Seok Yoon, 김수삼⁵⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ 한양대학교 공학대학 토목공학과 박사과정, Doctor's Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. Hanyang.

²⁾ GS건설 기술연구소 선임연구원, Research Engineer, GS Engineering & Construction Co. Ltd.

³⁾ (주)지구환경전문가그룹 기술연구소장, Head manager, Research laboratory, Expert Group for Earth and Environment Co. Ltd.

⁴⁾ 한양대학교 공학대학 토목공학과 박사과정, Doctor's Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. Hanyang.

⁵⁾ 한양대학교 공학대학 토목공학과 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 Preloading Method.

In this study, ground improvement efficiency of suction drain method was estimated when duplex loading pressure with vacuum and pressure. During suction drain method process, surface settlement and pore pressure were monitored, and cone resistance test as well as water content were also measured after the completion of Suction Drain Method treatment.

Keywords : Suction Drain Method, Duplex Loading Pressure, Surface Settlement, Cone Resistance, Water Content

1. 서론

Suction Drain 공법은 기존의 진공압밀공법의 단점으로 지적됐던, 기밀커버의 Sealing에 의한 문제, 적용 심도에 따른 효율 감소 등의 문제점을 보완하고자 지반에 타설된 연직 배수재에 진공압을 직접 가하여 간극수를 배출하는 공법이다. Suction Drain 공법은 진공압을 이용하여 원지반의 배수를 촉진시키는 방식은 기존의 진공압밀공법과 같다. 하지만 진공압밀공법이 배수재 타설 구간과 대기의 압력차에 의한 대기압 재하방식을 취하고 있는 반면, Suction Drain 공법은 지반 내 타설된 배수재를 진공펌프와 직접적으로 연결하기 때문에 전응력이 일정한 상태에서 간극수가 배출되며 유효응력이 증가하고 압밀이 진행되는 원리로 압밀이 촉진된다.

본 연구에서는 석션 드레인 공법에 양방향 압력재하 시스템을 적용하여 압밀 효율을 극대화하는 방법에 대한 그 효과를 검토하고자 하였다. 양방향 압력재하 시스템을 적용할 경우, 진공압과 양압력을 동시에 적용하기 때문에 기존의 공법보다 높은 개량 효율과 하드닝 존 밖의 간극수의 이동을 촉진하여 과잉 간극수압 발생을 유도하기 때문에 압밀촉진효과를 기대할 수 있다. 양방향 압력을 재하하는 방법은 기존의 배수재 배치 사이에 공기압을 가해주기 위한 배수재를 타설하여 진공압과 양압력을 동시에 적용하는 방법으로, 실험이 진행되는 동안 개량 시간에 따른 침하량을 측정 하였으며, 실험이 종료 후 최종침하량, 함수비, 콘저항치를 비교/분석하였다.

2. Suction Drain 공법의 원리

2.1 지반내 응력분포

연직배수공법과 Suction Drain 공법의 가장 큰 차이점은 지반내의 응력변화 상태를 파악하면 알 수 있다. 그림 1에서 응력변화 상태에서 재하압밀의 경우 압밀 종료 시, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

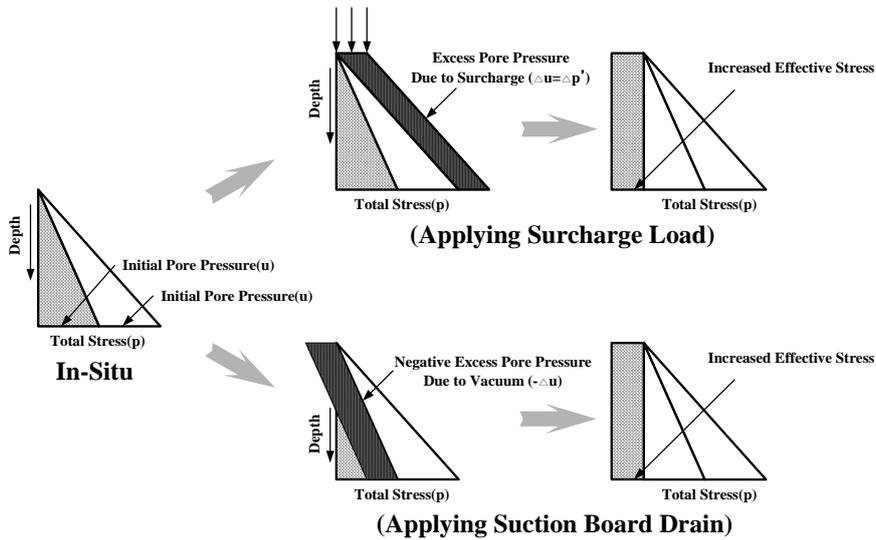


그림 1. 연직배수공법과 Suction Drain 공법의 응력 경로 비교(김기년, 2008)

$$P + \Delta p' = (p' + \Delta p') + u \quad (1)$$

여기서, P : 재하전의 전응력

p' : 재하전의 유효응력

$\Delta p'$: 압밀응력의 증가

u : 간극수압

재하압밀에서는 압밀 완료 후 전응력은 $\Delta p'$ 만큼 증가하게 된다. 반면에, 진공압밀에 있어서 간극수압을 자연 상태에서 감소시킨 량을 Δu 라 하면 식 (2)와 같다.

$$\Delta u = \Delta p' \quad (2)$$

즉, 증가하는 압밀하중은 간극수압의 감소값이 같고, suction Drain 공법의 경우 압밀 종료시, 식 (3)과 같다.

$$P = (p' + \Delta p') + (u - \Delta u) \quad (3)$$

이 상태에서 압밀에 작용하는 응력은 모두 $\Delta p'$ 만큼 증가한다. 그러나 재하압밀은 전응력이 $\Delta p'$ 만큼 증가하지만 진공압밀의 경우 전응력의 변화가 전혀 없다.

그림 2에는 성토재하공법과 Suction Drain 공법의 적용시 이론적인 응력경로를 나타내었다. 성토재하공법 적용시 하중재하를 멈추고 압밀이 시작되면서 소산된 간극수압의 정도에 따라 σ'_V 와 σ'_H 는 증가하게 되므로, 이때 응력경로는 BC 경로를 따르게 된다. 따라서 성토재하공법에 의한 응력경로는 성토하중

재하시 AB 경로를 따라다가 압밀시에는 BC경로를 따르게 됨을 알 수 있다.

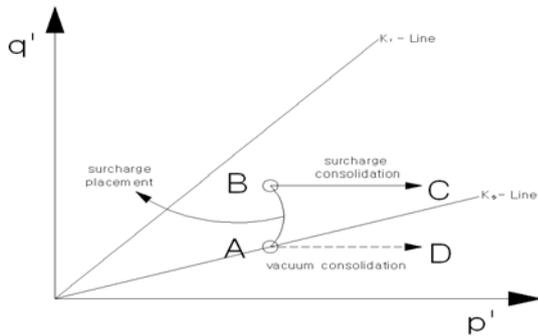


그림 2. 응력 경로의 비교(김기년, 2008)

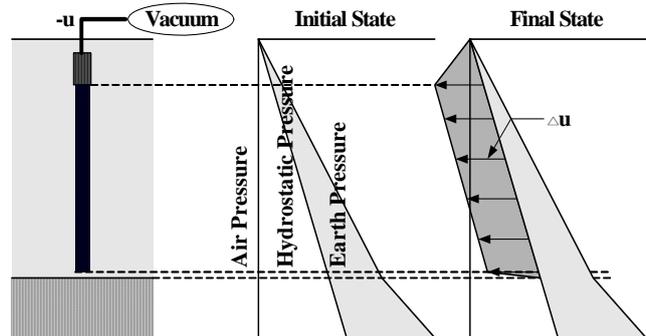


그림 3. Suction Drain 공법의 응력 변화(김기년, 2008)

성토재하공법에 의한 응력경로 ABC는 파괴포락선 근처에 존재하기 때문에 항상 파괴의 가능성을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 진공압밀의 경우에는 진공하중에 의한 압밀축진과 동시에 대기압 크기의 응력이 최대주응력, 최소주응력에 같은 크기로 가해지기 때문에 성토재하공법에서처럼 AB응력경로를 따르지 않는다. 따라서 진공하중에 의한 압밀축진 현상에 의해 소멸되는 과잉간극수압에 따라 지중의 σ'_V 와 σ'_H 는 증가하게 되는데, 대기압 진공하중은 등방압축이므로 증가되는 유효응력의 크기는 같다. 따라서 AD 경로를 따르게 되므로 응력경로는 파괴포락선으로부터 점점 멀어짐을 알 수 있다. 즉, 석션은 수직, 수평방향을 동시에 압축변형을 시키므로 이로 인해 전단에 의한 원호활동 파괴가 발생하지 않는다(김기년, 2008).

그림 3에 나타난 바와 같이 간극수압의 변화는 개랑영역의 상부에서부터 배수재의 상부까지는 간극수압이 서서히 감소하여 배수재의 상부에서는 적용시켜준 진공압에 도달하고, 이후 연직배수재의 타설심도까지 일정하게 감소하는 경향을 나타낸다.

3. 실내 실험

3.1 대상 시료의 특성

시료의 지반 공학적 물리적 특성은 표 1에 제시하였다. 시료조성 시 완전포화체로 재조성하면서 시험여건을 고려하여 타설 시 용이하도록 액성한계보다 높은 함수비(70%)를 갖도록 교반하여 시험을 실시하였다.

표 1. 실험에 사용된 시료의 토질공학적 특성 (김성호, 2010)

USCS	Liquid Limit(%)	Plastic Limit(%)	Plastic Index(%)	Specific Gravity
CL	42.2	25.5	16.7	2.724

3.2 실험기 및 실험 조건

본 연구에 사용된 실험기는 '가로×세로×높이=1m×1m×1m=1m³'인 사각토조로써 내부 변화를 관찰할 수 있고 압력변화에 충분히 견딜 수 있도록 아크릴 재질로 제작하였다(그림 4). 그림 5와 같은 나선형 주름 배수재 실험에 사용하였고, 시간에 따른 침하량을 측정하고, 재하판의 기울어짐에 따른 측정 오차

를 최소화하기 위해 재하판 상부의 좌우에 다이얼 게이지를 설치하였다(그림 6). 표 2에 제시한 실험을 통해 양방향 압력재하를 적용한 Suction Drain 공법의 효율을 파악하고자 하였다. 적용 진공압은 본 연구에 사용된 시료의 최적의 단계진공압 적용기간 실험에 의해 산정된 단계 진공압(-0.2kgf/cm² → 1.2일, -0.4kgf/cm² → 2.0일, -0.6kgf/cm² → 2.1일, -0.8kgf/cm² → 39.7일)으로 하였다(김성호, 2009).

표 2. 양방향 압력재하의 압밀 효율 평가

고정인자							변동인자
No.	시료 종류	적용 기간	배수재 길이	Sealing 층 두께	적용 진공압 (kg/cm ²)	배수재 종류	Pressure (kg/cm ²)
Case1	CL	45일	500mm	500mm	-0.2kgf/cm ² → 1.2일, -0.4kgf/cm ² → 2.0일,	나선형 주름 배수재 (SCD)	없음
Case2					-0.6kgf/cm ² → 2.1일, -0.8kgf/cm ² → 39.7일		0.2kgf/cm ² → 1.2일, 0.4kgf/cm ² → 2.0일, 0.6kgf/cm ² → 2.1일, 0.8kgf/cm ² → 39.7일



그림 4. 실험 전경



그림 5. 나선형 주름 배수재(SCD)

3.3 양방향 압력재하에 의한 효율 파악

실험 종료 후의 개량 효율을 콘 저항치와 함수비를 측정하여 파악하고자 하였다. 그림 7에서와 같이 실험기 상단을 기준으로 200mm, 400mm, 500mm, 600mm, 700mm, 800mm의 6개 층에 대해서 각각 49개의 지점에 대해 측정을 하였다. 측정된 콘 저항치와 함수비 변화는 배수재와 측정 지점과의 거리에 따라 배수재에서 가까울수록 Zone A', Zone A, Zone B, Zone C의 4개의 영역으로 나누어 개량 효율을 파악하고자 하였다.

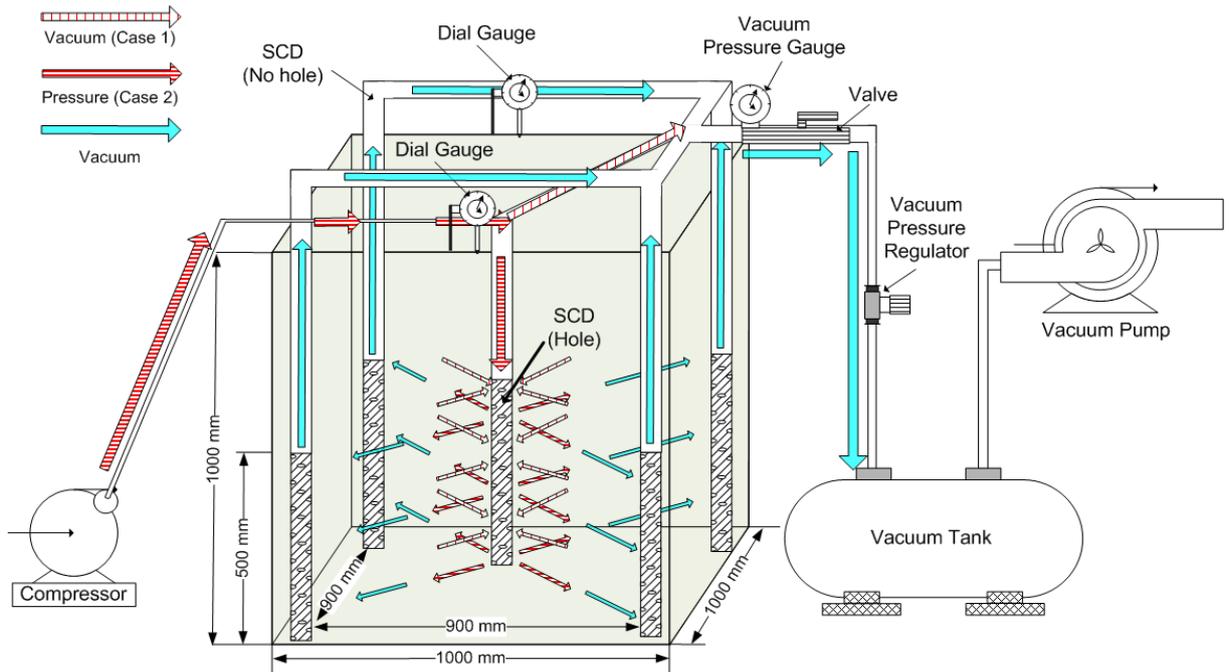


그림 6. 양방향 압력재하의 압밀 효율 평가 모식도

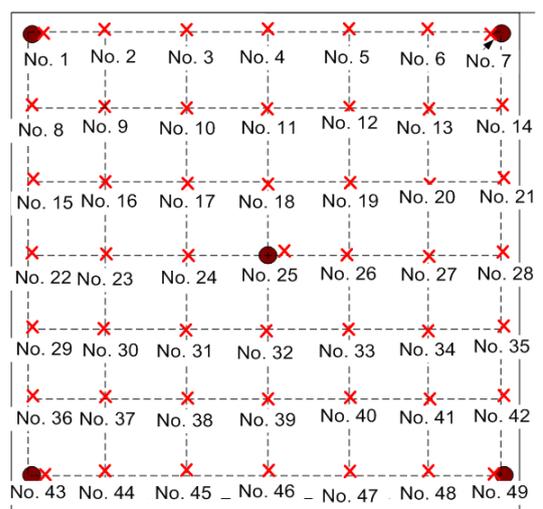
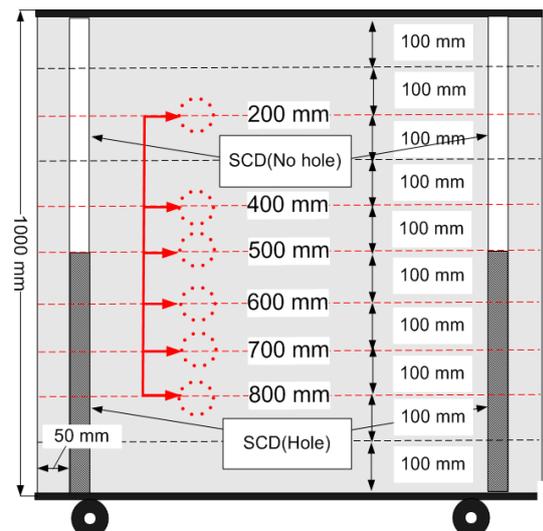


그림 7. 콘 저항치 및 함수비 측정 위치(연직방향) 그림 8. 콘 저항치 및 함수비 측정 위치(수평방향)



그림 9. 콘 및 함수비 측정 위치



그림 10. 콘 저항치 측정



그림 11. 함수비 측정

4. 실험 결과 및 분석

4.1 양방향 압력재하의 침하 효율 특성

그림 12에 나타나듯이 최종 침하량은 양압력을 적용하지 않았을 경우 152.45mm, 양압력을 적용하였을 경우 156.9mm로 양방향 압력재하에 의한 침하 효율이 좋은 것으로 나타났다. -0.2kgf/cm^2 와 -0.4kgf/cm^2 의 단계 진공압으로 재하할 때까지는 두 실험의 침하량이 거의 유사하게 나타났으나, -0.6kgf/cm^2 이상의 진공압을 적용한 후, 양압력을 적용한 실험의 침하량이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

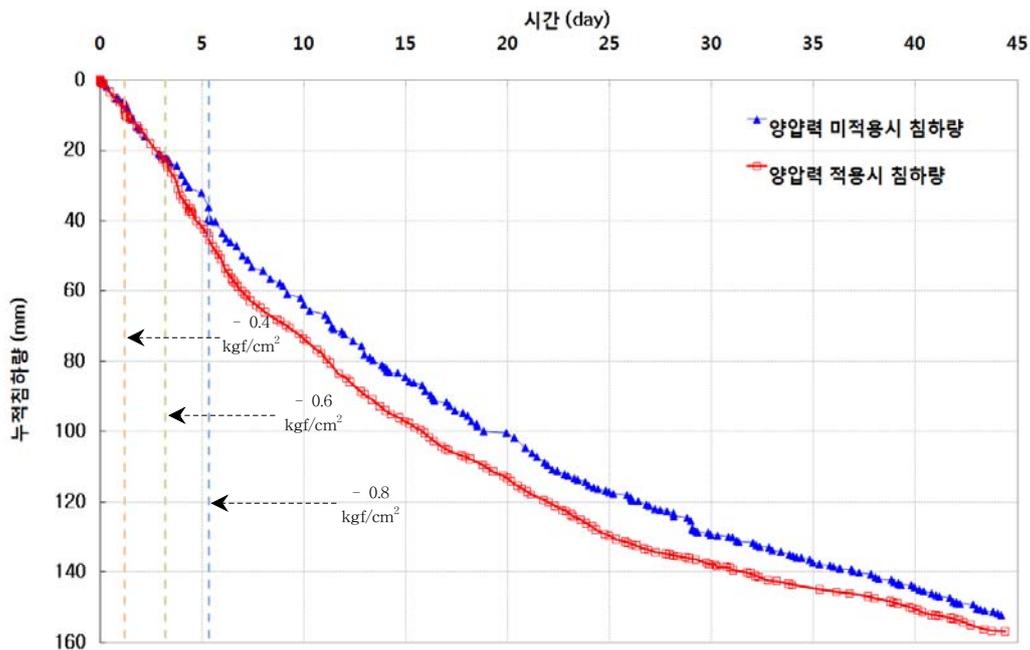


그림 12. 양방향 압력재하의 침하량

4.2 양방향 압력재하의 강도 변화 특성

실험 종료 후의 개량 정도를 파악하기 위해 콘 관입치를 측정하여 강도 특성을 파악하였다. 그림 13과 14에 개량 심도에 따른 강도를 각각 양압력의 적용 여부에 따라 제시하였다. 그림 13에서 보듯이, 양압력을 적용하지 않았을 경우, 배수재와 가장 가까운 영역인 Zone A'의 강도를 제외하고, Zone A, B, C의 강도의 차이는 미미하였다. 이러한 결과는 실험기의 모든 영역이 배수재의 영향 반경에 모두 포함되었기 때문이라고 판단된다. 양압력을 적용한 그림 14의 경우, 모든 영역의 강도가 유사한 경향을 나타낸 것을 알 수 있었다. 50cm 이상의 깊에서는 양압력을 적용한 경우의 강도 값인 Zone A'(+)~Zone C(+)가 양압력을 적용하지 않았을 경우의 Zone A'(-) 보다 낮은 강도를 나타냈고, Zone A(-)~Zone C(-)에 비해서는 큰 강도를 나타냈다. 이를 통해 양압력을 적용할 경우 지반 전체가 균질하게 개량된다고 판단된다.

4.3 양방향 압력재하의 함수비 변화 특성

실험 종료 후의 개량 정도를 파악하기 위해 그림 15와 16에 각각 양압력 미적용시와 적용시의 개량

심도에 따른 함수비를 나타냈다. 양압력을 적용하지 않은 경우, 배수재 인접 영역에서의 함수비 저감 현상이 두드러지게 나타나는 반면, 양압력을 적용한 경우에는 개량 심도와 개량 영역의 전반적으로 고르게 개량된 것을 알 수 있었다.

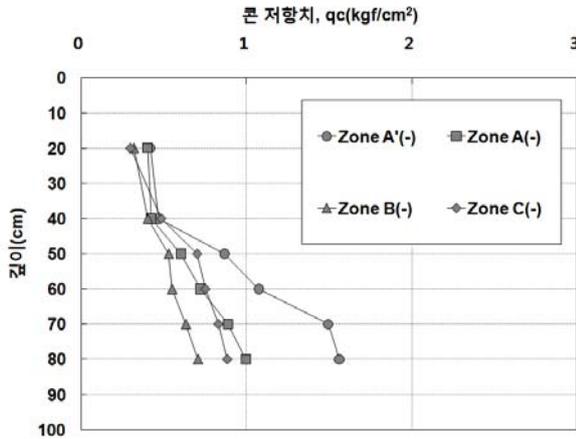


그림 13. 양압력 미적용시의 콘 저항치(kgf/cm²)

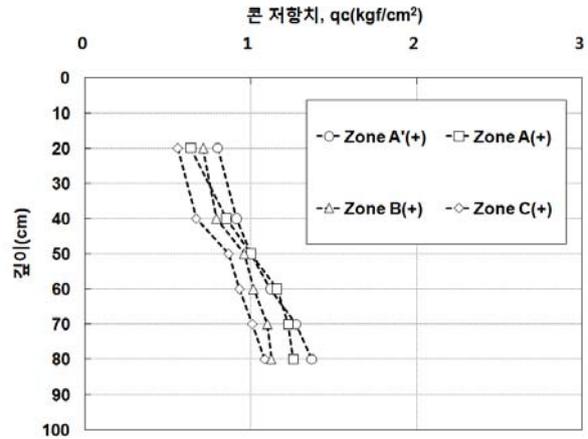


그림 14. 양압력 적용시의 콘 저항치(kgf/cm²)

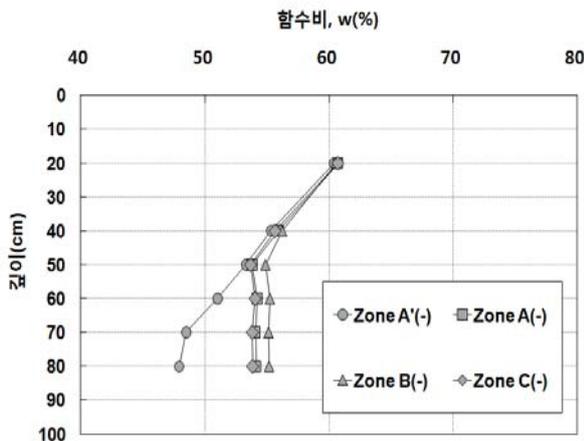


그림 15. 양압력 미적용시의 함수비(%)

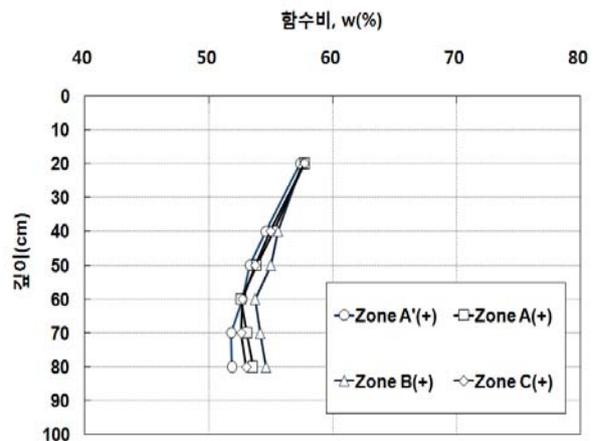


그림 16. 양압력 적용시의 함수비(%)

5. 결론

본 연구에서는 Suction Drain 공법에 있어서 양방향 압력재하의 효율을 파악하기 위해, 침하량, 콘 저항치, 함수비를 측정하였고, 이를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 양압력을 적용하지 않았을 경우의 최종 침하량은 152.45mm, 양압력을 적용하였을 경우의 최종 침하량은 156.9mm로 양방향 압력재하에 의한 침하 효율이 좋은 것으로 나타났고, -0.6kgf/cm^2 이상의 진공압을 적용한 후, 양압력을 적용한 실험의 침하량이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.
2. -0.6kgf/cm^2 이상의 진공압을 적용한 후 양압력을 적용한 실험의 침하량이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

3. 양압력을 적용한 경우, 배수재와의 거리에 따른 강도 특성의 차이는 미미하였고, 모든 영역의 강도가 유사한 경향을 나타낸 것을 통해 양압력을 적용할 경우 지반 전체가 균질하게 개량됨을 알 수 있었다.
4. 양압력을 적용하지 않은 경우, 배수재 인접 영역에서의 함수비 저감 현상이 두드러지게 나타나는 반면, 양압력을 적용한 경우에는 개량 심도와 개량 영역의 전반적으로 고르게 개량된 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김종윤, 안동욱, 윤명석, 한상재, 김수삼(2006), “단계 석션압에 따른 Suction Drain 공법의 효율 평가”, 2006 한국지반공학회 가을학술발표회, pp. 1184~1189.
2. 김기년(2008), “석션보드드레인 공법에서 하드닝 존을 고려한 압밀 침하 해석”, 한양대학교 대학원 박사학위논문.
3. 김성호(2010), “Suction Drain 공법에서 단계 진공압 적용기간에 따른 압밀 효율에 관한 연구”, 한양대학교 대학원 석사학위논문.