

필터형 진공압밀공법을 이용한 고함수비 점토지반의 개량효과

The Effects of Improvement in Clay with High Moisture Contents Using the Filter Type Vacuum Consolidation Method

오 세 옥[†]

Oh, Sewook

ABSTRACT : This study are carried out to an lab model tests to develop a construction method that solidifies high-water content cohesive soil by using filter type drain and vacuum pressure, and that stabilizes the ground by accelerating horizontal drain at incline or in tunnel. The calibration chamber was designed within length of 1.5m and height of 50cm, and a drainage hole for preconsolidation, a switchgear and a piezometer were installed at the bottom part of the chamber. Also, a settlement gage was installed at the top part so that it can measure the settlement by time. The calibration ground basis was made in a form of thin layer from kaolinite and bentonite in 9:1 ratio stirred at 130% water content condition. A filter type drain was installed at chamber center and a vacuum pressure of 0.8MPa was applied through a hose linked to the cap at the top part, then, the settlement was measured in every 1 hour interval. After experiment, the moisture contents were measured by position, then, verified the increase of solidity of the ground through a triaxial compression test on undisturbed profile. After 11 days from the effective date, it was observed that the settlement decreased by maximum 35mm and the water content ratio was reduced by 38% at most while the solidity of the ground increased by 5~8 times greater than before preconsolidation.

Keywords : High-water content cohesive soil, Filter type drain, Vacuum pressure, Preconsolidation, Triaxial compression test

요 지 : 필터형 배수재와 진공압을 이용하여 고함수비 점성토의 고화처리와 사면이나 터널의 수평배수를 촉진하여 지반을 안정화 하는 공법을 개발하기 위하여 실내모형 시험을 수행하였다. 모형토조는 직경 1.5m, 높이 50cm로 제작하였으며, 토조하부는 사전압 밀을 위한 배수구 및 개폐장치, 간극수압계를 설치하였고, 상부에는 침하계를 설치하여 시간별 침하를 계속할 수 있도록 제작하였다. 모형지반은 카오리나이트와 벤토나이트를 9:1의 비율로 130%의 함수비 상태에서 혼합 교반하여 박층으로 다져가면서 조성하였으며, 토조 중심부에 필터형 배수재를 설치하고 상부 캡에 호스를 연결하여 0.8MPa의 진공압을 가한 다음 1시간 간격으로 침하를 측정하였다. 실험종료 후 위치별로 함수비를 측정하고 불교란 시료의 삼축압축시험을 수행하여 지반의 강도증가 효과를 검증하였다. 11일 경과 후 침하는 최대 35mm, 함수비는 최대 38% 감소하였으며, 강도는 5~8배정도 증가하는 것으로 나타났다.

주요어 : 고함수비 점토지반, 필터형 배수재, 진공압, 사전압밀, 삼축압축시험

1. 서 론

배수재를 이용한 초연약지반의 압밀촉진 공법은 고함수비 점성토의 고화처리 뿐만 아니라 수평배수에 의한 지반 안정화 기술, 폐기물 처리장의 침출수 처리 등 다양한 환경 개선을 위한 시공 및 설계기술 개발을 촉진시킬 수 있다. 국내에 광범위하게 분포하고 있는 해성점토 연약지반과 최근 활발하게 진행되고 있는 준설, 매립공사가 점차 대규모화 되면서 연약지반의 개량 및 강도증진을 위하여 배수공법이 많이 사용되고 있다. 배수공법을 위한 재료로는 샌드드레인, 팩드레인, 플라스틱드레인 등이 주로 사용되고 있으나, 지역에 따라 모래공급에 문제가 있고 재하공법과 병행해야

한다는 문제점이 있다(유경승 등, 2003). 특히 남해안 지역의 경우 재하를 위한 성토재를 공급하는데 어려움이 있으며, 긴급을 요하는 공사나 초연약지반에서는 압밀촉진 효과가 미흡한 실정이다.

현재 국내에서는 많은 장점이 있는 진공압밀공법의 시공 사례가 증가하고 있는데 차단막에 대한 기밀상태를 유지해야 하는 등의 문제가 발생하고 있다. 외국의 경우, 이러한 문제점을 해결하기 위해 일본이나 네델란드에서 개발된 캡형 진공압밀공법 등이 사용되고 있다(김주형, 2006).

최근 중국, 일본, 프랑스 등지에서 현장에 적당한 드레인을 이용한 진공압밀이 실제로 시공되었는데 진공압밀이 재래적 방법의 성토공법보다 시간적으로 단축되고 진공효율

[†] 정희원, 경북대학교 이공대학 토목공학과 조교수(E-mail : osw@knu.ac.kr)

75%의 진공도로 일반 성토고 4.5m의 효과를 나타내었다(이송 등, 1997). 우리나라에서도 김해쓰레기 매립지와 광양항 연약지반처리 등에 시도되었다.

또한 국내에서는 구조물의 배수공이나, 각 공중에서 평면 배수용 재료로 이용되어 왔던 제품을 이용하여 연약지반 처리공에서 배수재 등으로 활용한 예가 있다(김선구 등, 2001).

대기압공법 또는 진공압밀공법은 비닐쉬트 등의 기밀한 막으로 지표면을 덮은 다음 진공펌프를 작동 시켜서 내부의 압력을 내려서 대기압을 하중으로 이용하여 유효하중을 증가시키는 공법이다. 이 진공압밀공법은 침투압 공법이든가 웰 포인트 공법과 같이 점성토 중의 간극수압을 내려서 유효응력을 증가시켜 압밀을 촉진시키는 방법이며 재하중을 필요로 하지 않는다. 따라서 지표면이 연약하여 성토가 곤란한 매립지와 재하중을 철거하여야 하는 경우에 적합하다(Kjellman, 1952).

그러나 현재 일반적으로 사용하고 있는 진공압밀공법은 압밀 기간 중에는 밤낮으로 펌프를 가동시켜야 되며, 비닐쉬트 등 기밀한 막이 손상될 경우 기능이 현저히 저하되므로 관리가 어려운 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 압밀기간 중 진공압을 측정하여 진공압이 현저하게 저하되었을 때에만 진공압을 가하고 비닐쉬트가 필요 없는 필터형 배수재를 이용한 진공압밀공법의 효과를 검증하고, 향후 이를 준설점토지반의 표층개량 및 압밀을 촉진하는 공법으로 이용하기 위한 기초자료를 제공하고자 실내 모형실험을 수행하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 필터형 배수재

일반적으로 진공압밀공법은 보통 Paper Drain 등과 병용된다. 단독으로 사용하여 Preloading공법과 같은 효과를 기대할 수도 있지만 이 경우 공기가 길어지며 또 최종적인 간

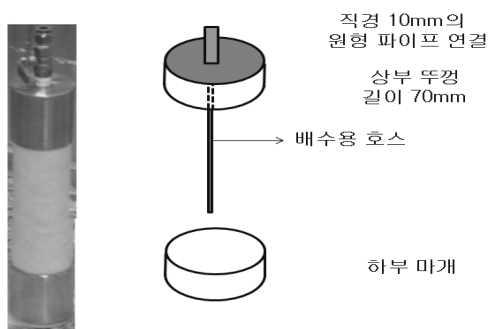


그림 1. 필터형 배수재

극수압이 감소하다가 증가하므로 유효하중의 증가분이 반감하기 때문이다.

필터형 배수재는 원통형으로 제작되었으며 진공압을 전달하여 강제 배수를 하는 상부 캡과 토사의 유입을 막아주는 하부 캡으로 구성되어 있다. 상부 캡 안쪽으로는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 호스를 연결하여 필터형 배수재에 진공압에 의해 흡수된 물이 효과적으로 배수할 수 있도록 하였다.

대기압을 이용한 진공압밀공법에서는 유효하중의 증가분으로서는 이론적으로 100kPa까지 기대할 수 있지만 지금까지의 실시 예에 의하면 70kPa 정도이다(박중배 등, 2002).

본 연구에서는 진공압에 의한 영향을 검토하기 위하여 40, 60, 80kPa의 진공압을 사용하였다.

2.2 대형토조실험

대형토조실험은 원형의 강철 프레임으로 이루어진 대형의 압밀 및 배수시험으로써 배수재 타설지반의 배수압밀 거동을 모델화한 시험이며 지반내에 배수재를 타입하고 진공압을 가하였을 경우 발생하는 지반의 압밀 거동 및 이로 인한 과잉간극수압의 변화를 연구하는 것을 목적으로 하고 있다.

본 연구에 사용된 시험장치는 그림 3에서 보는 바와 같이 직경 1,500mm의 원형 단면을 가진 강재로 제작된 모형토조, 진공압을 가하기 위한 68HP의 진공펌프, 진공압을 필터에 전달하고 흡입된 물을 저장하기 위한 진공탱크, 침하량



그림 2. 모형지반 조성과정



그림 3. 시험장치 구성도

을 측정하기 위한 마그네틱 변위센서, 간극수압계, 데이터를 실시간으로 저장할 수 있는 자동기록장치 등으로 구성되어 있다. 그림 2와 같이 지반을 조성한 후 필터를 타입하고 필터에 진공압을 가하면 진공압에 의하여 흡입된 물이 필터의 상부캡과 연결된 호스를 통해 진공탱크로 배출 되도록 하였다. 지반의 침하량은 마그네틱 변위센서를 이용하여 상부 지반의 변위를 1시간 간격으로 측정하여 자동으로 컴퓨터에 저장되도록 하였고, 모형토조의 하부에는 간극수압계를 설치하여 시간에 따른 간극수압의 변화를 측정하였다.

3. 실내 시험결과 분석

3.1 지반과 필터 배수재 특성

모형지반은 카오리나이트와 벤토나이트를 9:1의 비율로 혼합 교반하여 박층으로 다져서 조성하였으며, 토조 중심부에 필터형 배수재를 설치하고 상부 캡에 호스를 연결하여 0.08MPa의 진공압을 가한 다음 1시간 간격으로 침하를 측정하였다. 시료의 물리적 특성과 모형지반의 역학적 특성은 각각 표 1과 표 2에 나타난 바와 같고 0.075mm 통과백분율은 98.3%로 나타났다.

모형지반 성형 시 시료의 함수비는 액성한계의 2배인 130%로 조성하였으며, 24시간 동안 하부 배수를 통하여 지반이 안정화 되도록 하였다. 24시간 경과 후 시료의 함수비는 113%였으며, 비배수점착력은 시료가 너무 연약하여 베인시험에 의하여 측정하였으며, 약 0~2kPa로 측정되었다.

표 1. 시료의 물리/역학 특성

물성	기호	단위	측정값
초기함수비	w_o	%	113.0
단위중량	γ_t	kN/m ³	18.0
액성한계	W_L	%	65.0
소성지수	I_P	-	21.0
초기간극비	e_o	-	2.18
비중	G_s	-	2.65
포화도	S_r	%	95~98
압축지수	C_c	-	0.49
평균압밀계수	C_v	cm ² /sec	0.027
비배수전단강도	c_u	kPa	4.0

표 2. 필터의 공학적 특성

Particle size (μ m)	Size (ϕ , mm)	Cross Sectional Areas (cm ²)
25	60	21.2

그림 4는 모형지반에 대한 압밀곡선을 보여주고 있으며, 압밀시험 결과 초기간극비는 2.18, 압축지수는 0.49로 나타났다.

필터형 배수재는 연약지반수의 원활한 배수를 위하여 Melt-Blown Technology로 방사 성형된 섬유 직경이 5~100 μ m로 형성된 구조로 높은 포집효과와 표면여과 방지에 의한 수명향상을 가지도록 설계된 필터이며 PP소재의 특성상 각종 화학약품에 대한 내화학성, 내열성이 우수하다. 그림 5는 필터의 내부 구조를 보여주고 있으며, 외경 60mm, 내경 30mm의 크기로 제작되었다.

필터형 배수재 주변의 지반수는 필터를 통하여 배수재 내부로 유입되고, 진공압을 이용하여 외부로 배출된다. 따라서 배수재는 큰 상재하중 하에서도 통수단면의 감소가 비교적 적으며, 배수재 내부는 토립자에 의한 구멍막힘(Clogging)이 생기지 않아야 된다.

본 연구에 사용된 필터형 배수재의 특성은 표 2와 같다.

3.2 실험결과

3.2.1 함수비와 간극수압 변화

원통형 압밀시험 종료 후 최종 함수비의 분포를 측정하기 위하여 그림 6에 나타난 바와 같이 시료를 상부, 중부, 하부의 3개 층으로 나누어 각 층마다 시료의 중앙을 중심으로 열십자 방향으로 총 72개 지점의 함수비를 측정하였다.

그림 6은 토조내의 배수재 배치방법과 간극수압 측정기의 위치를 설명한 것으로 간극수압의 측정은 3개의 위치에서 실시하며, 각각 필터직경의 2배(12cm), 4배(24cm), 8배(48cm) 지점에 간극수압 Probe를 설치하였다.

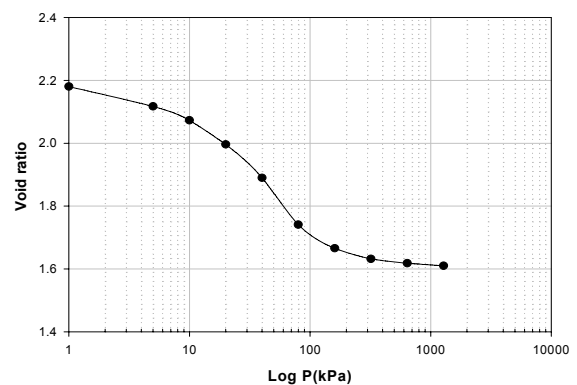


그림 4. 초기시료의 e-log P곡선



그림 5. 필터형 배수재의 내부구조

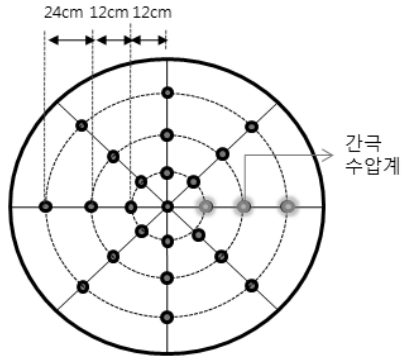


그림 6. 토조내의 배수재 배치방법과 간극수압계의 위치

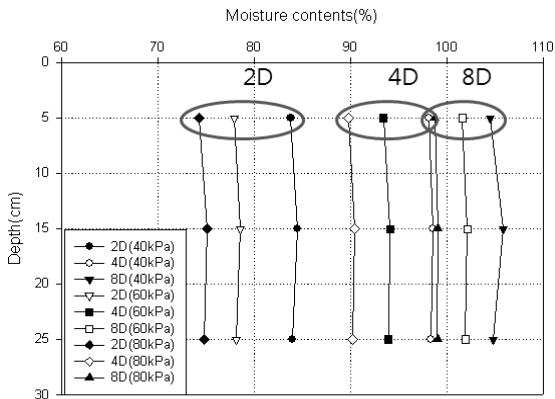


그림 7. 깊이에 따른 함수비 분포

그림 7은 진공압의 크기와 배수필터로부터 수평거리 및 깊이에 따른 함수비의 분포를 나타낸 그림으로 각 방향별로 평균하여 함수비를 나타내었다. 그림 7에 나타나 있듯이 배수재로부터의 거리가 필터직경의 2배(2D)인 경우 진공압에 따라 38~25%의 함수비 감소효과가 나타났으며, 진공압이 40kPa인 경우에 비해 60, 80kPa인 경우 함수비 감소효과가 크게 나타났다.

그러나 거리가 4D, 8D로 멀어짐에 따라 진공압의 크기에 따른 함수비는 4D에서는 약 20%, 8D에서는 약 10%의 함수비가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 깊이에 따른 함수비의 변화가 거의 없는 것으로 나타나 깊이와 방향에 관계없이 균일한 지반개량효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 8은 거리에 따른 함수비 분포를 보여주고 있으며 그림에서 보는 바와 같이 2D에서 4D사이의 함수비 변화가 큰 것으로 나타났다.

그림 9는 거리별 간극수압의 변화를 정규화한 것으로 간극수압의 소산속도는 진공압의 크기에는 큰 영향을 받지 않으며, 배수재로부터 거리가 멀수록 소산속도는 느려지고 불규칙한 것으로 나타났다.

3.2.2 침하량

진공압을 가하면서 시간별로 필터형 배수재의 중심으로

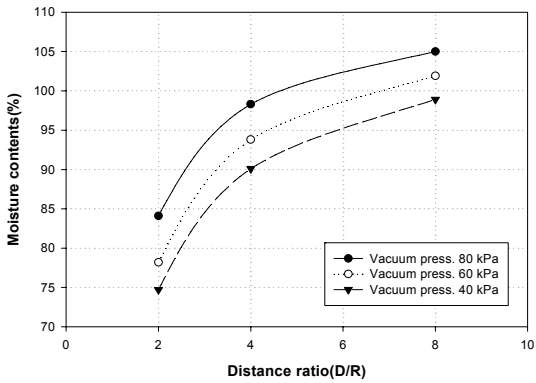


그림 8. 거리에 따른 함수비 분포

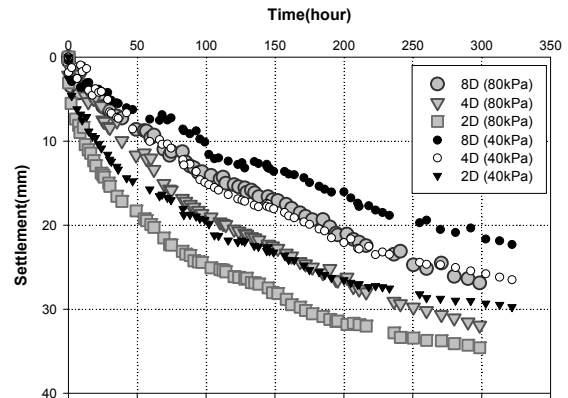


그림 10. 시간경과에 따른 거리별 침하량

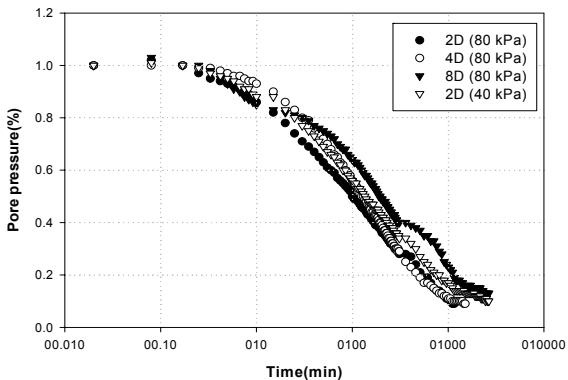


그림 9. 간극수압 소산 실험결과

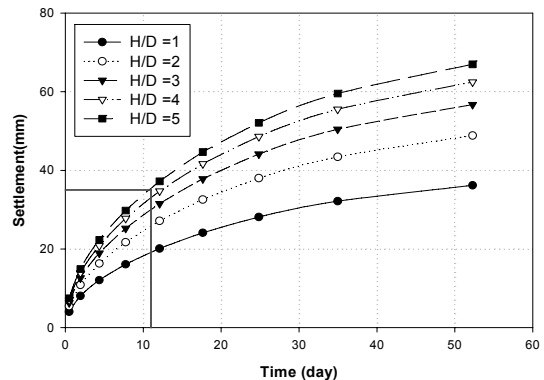


그림 11. 성토고에 따른 시간별 침하량 계산결과

부터 침하량을 측정한 결과 그림 10과 같이 26mm~35mm의 침하량을 보이고 있다. 그림 11은 초기 시료의 압밀시험 결과 산정된 초기간극비와 압축지수 및 선행하중을 자료로 침하량을 산정한 결과를 보여주고 있다. 성토재의 단위중량은 18kN/m^3 으로 가정하였으며, 성토고는 연약지반의 층후(D)와 성토고(H)와의 비를 기준으로 침하량을 산정하였다. 그림에서 보여주듯이 필터형 배수재를 사용하여 진공압밀 후 11일 후 필터재로부터 가장 가까운 지점(2D)의 침하량에 달하기 위해서는 연약지반 두께(D=35cm)의 5배에 해당하는 성토하중이 필요함을 알 수 있다. 또한 성토비(H/D) 1에서 동일한 침하량에 도달하기 위해서는 필터형 배수재를 사용한 진공압밀공법에 비해 약 4배의 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

3.2.3 강도변화

함수비 90% 이상의 시료에 대해서는 베인 시험을 수행하였으며, 시험결과 0~3kPa 정도의 비배수점착력이 측정되었다. 진공압밀 실험 종료 후 베인시험에 의한 비배수 전단강도는 15~24kPa로 측정되어 약 5~8배 정도의 강도가 증가하는 것으로 나타났다.

그림 12는 시료의 함수비 변화에 따른 강도변화를 추정하기 위하여 동일한 시료에 대하여 각 함수비별로 시료를 성형한 후 베인시험을 수행한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 함수비가 감소할수록 비배수 전단강도가 지수함수의 형태로 비선형적으로 증가하는 것을 보여주고 있다. 이는 시료내의 함수비가 줄어들수록 간극수의 음의 압력이 커져서 흙 입자간의 결속을 더 단단히 해주기 때문으로 판단된다(이송 등, 1997).

그림 12로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$c_u = 1582.8e^{-0.0604w} \quad (1)$$

여기서, c_u = 비배수점착력(kPa), w = 함수비(%)

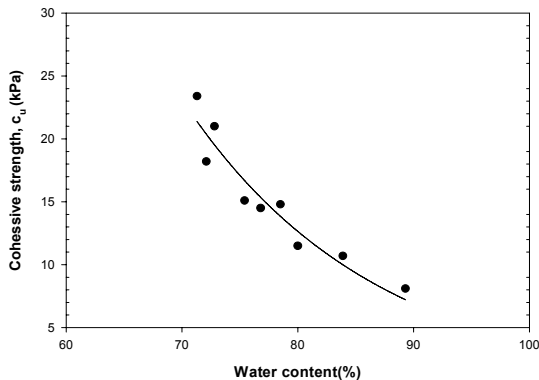


그림 12. 함수비 변화에 따른 비배수 전단강도

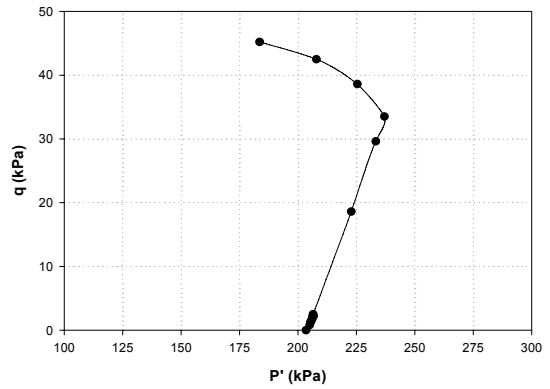


그림 13. 실험 종료 후 삼축시험결과(응력경로)

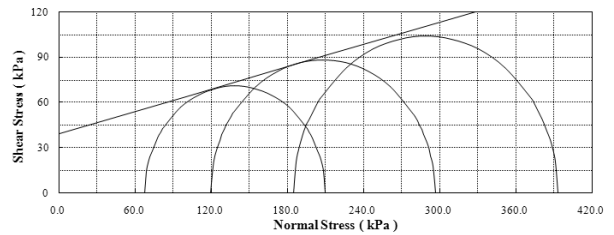


그림 14. 진공압밀 실험 후 시료의 전단강도

그림 13과 14는 진공압밀 후 배수재로부터 2D의 거리에서 채취한 불교란 시료에 대한 압밀비배수 삼축압축시험을 수행한 결과이다. 그림 13은 응력경로를 보여주고 있으며, 변형률 5.86%에서 축차응력이 peak에 도달하는 것으로 나타났다.

그림 14는 동일한 시료에 대하여 강도 증가를 알아보기 위하여 압밀비배수 삼축압축시험을 수행한 결과를 나타낸 것으로 시험결과 유효점착력은 39.14kPa, 내부마찰각은 약 14° 로 나타났다.

4. 결 론

필터형 배수재를 이용한 진공압밀공법의 효과를 검증하고, 준설점토지반의 표층개량 및 압밀을 촉진하는 공법으로 이용하기 위한 기초자료를 제공하고자 실내 모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론은 도출하였다.

- (1) 진공압 80kPa으로 11일간 진공압밀을 수행한 결과 필터 직경의 2.0배(2D) 거리에서는 초기 함수비 보다 38%, 4D에서는 20%, 8D에서는 10%의 함수비가 감소하는 것으로 나타났다. 진공압이 40kPa인 경우에 비해 60, 80kPa인 경우 함수비 감소효과가 크게 나타났으나 거리가 4D, 8D로 멀어짐에 따라 진공압의 크기에 따른 함수비 감소 효과는 크지 않은 것으로 나타났다.

(2) 깊이와 방향에 따른 함수비의 변화를 측정한 결과 깊이와 방향에 관계없이 비슷한 함수비 분포를 나타내고 있어 필터형 배수재는 균일한 지반개량효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

거리에 따른 함수비 분포를 측정한 결과 2D에서 4D사이의 함수비 변화가 큰 것으로 나타나 배수재 영향반경은 2D~4D사이인 것으로 추정된다.

(3) 최종 침하량 측정결과 진공압과 배수재로부터 거리에 따라 각각 연약지반 층 두께(D)의 0.07D~0.1D의 압밀효과가 나타났다. 이는 연약지반 층 두께(D)의 5배에 해당하는 사전성토 하중 효과에 해당하며, 연약층의 두께만큼 성토하였다고 가정하였을 때 압밀기간은 1/4로 단축되는 것으로 추정되었다.

(4) 비압밀비배수 삼축시험을 수행한 결과 함수비와 비배수 전단강도(c_u)에 대하여 식 (1)과 같은 관계식을 얻었다. 진공압밀 효과를 확인하기 위하여 압밀비배수 삼축압축시험을 수행한 결과 유효점착력은 39.14kPa, 내부마찰각은 약 14°로 나타났다.

(5) 압밀촉진에 의한 고함수비 연약지반 개량에 있어서 필터형 배수재를 이용한 진공압밀공법을 활용하여 압밀기간 단축과 Preloading효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 「2008년도 경북대학교 신입교수 정착연구비에 의하여 연구되었음」.

참고 문헌

1. 김선구, 김성운, 박중배, 김유석(2001), *해안공간 개발 및 신항만 건설을 위한 준설 매립 지반의 수평진공배수공법에 대한 시스템기술 개발에 관한 연구*, 건설교통부 & 한국건설기술연구원, pp. 12~45.
2. 김주형(2006), *캡형진공압밀공법을 통한 지반개량공법*, 건설기술정보, Vol. 267, pp. 7~10.
3. 박중배, 김홍석, 김성준, 강명찬, 이송(2002), 표층처리를 위한 수평진공 배수공법의 현장 적용성에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, Vol. 22, No. 5-C, pp. 545~554.
4. 유경승, 홍원표, 윤길림(2003), 모형실험에 의한 Plastic Board Drain이 적용된 연약지반의 압밀거동에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 4, No. 4, pp. 7~23.
5. 이 승, 이규환, 전제성(1997), 원통형 드레인을 사용한 진공압밀공법의 효과 분석, *대한토목학회 논문집*, Vol. 17, No. 3-2, pp. 209~216.
6. Kjellman, W.(1952), Consolidation of Clay Soil by Means of Atmospheric Pressure, *Proceedings of Conference on Soil Stabilization*, MIT, Vol. 6, pp. 258~263.

(접수일: 2010. 6. 26 심사일: 2010. 6. 30 심사완료일: 2010. 7. 19)