산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집) 제21권 A호, 2001
Journal of Industrial Technology, Kangwon Nat'l Univ.,Korea, No. 21 A, 2001.

배수재의 직경과 형상변화가 수평진공배수에 미치는 영향

Effects of Size and Shape of Drain on Horizontal Vacuum Drain

유 남 재* 박 병 수** 정 길 수*** 이 병 곤****
Yoo, Nam-Jae Park, Byung-Soo Jeong, Gil-Soo Lee, Byung-Kon

ABSTRACT

This paper is experimental results of investigating the efficiency of horizontal vacuum drainage system. Effects of size and shape of drain on horizontal vacuum drainage were studied. Model tests in the laboratory with soft marine clay were carried out with drain pipe of having three different diameters and PBD (Plastic Board Drain) of strip shape so that consolidation settlement of soft clay due to applied vacuum pressure, amount of discharge, ground settlement and distributions of pore pressure and undrained shear strength were measured during testing.

From results of model test, amount of discharge due to vacuum pressure was increased with the diameter of pipe drain whereas the drain efficiency of pipe in per unit area of drain surface was decreased with diameter of pipe. The rate of discharge per unit time was reduced very fast with diameter of pipe. Settlement of ground surface with time was increased with diameter of pipe as a result of increase of discharge to drain pipe.

키워드 : *준설매립토, 압밀, 배수재의 직경과 형상, PBD, 수평진공배수*
Keywords : *Dredged and Reclaimed Soil, Consolidation, Diameter and Shape of Drain, Horizontal Vacuum Drain*

1. 서 론

해성 점성토를 매립지에 투입하면 고함수비 슬러리의 초기상태에서 침강 퇴적하면서 연약지반이 조성되며 준설토의 자 중압밀종료후 지반이 안정한 상태에 이르기까지는 매립심도 및 매립토의 압밀특성에 따라 약 2~3년의 장기간이 요구된다. 지반안정화에 이르는 기간을 단축하기 위하여 연직배수공법등 심층처리 공법이 필요하다. 그러나, 준설매립지반의 자중압밀기간 동안은 높은 함수비로 전단저항력이 매우 약하여 압밀가속화를 위한 심층처리 공법 적용을 위한 건설장비의 진입이 요구되나 그의 주행성 확보에 어려움이 예상된다. 따라서, 자연건조공법이나 표층배수공법, 수평진공배수공법 등의 다양한 준설매립토 지반의 표층처리공법의 적용이 예상된다.

일반적으로 적용되고 있는 자연건조공법이나 표

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사
*** 강원대학교 대학원 토목공학과, 박사과정
**** 강원대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

층배수공법은 저렴한 공사비로 표층처리가 가능하나 장기간의 시간소요가 요구되며 Sheet나 Net 부설공법은 그 상부의 Sand Mat를 지지할 수 있는 소요의 전단강도를 확보하여야 하는 문제점이 있어서 준설매립토와 같이 초연약한 지반에 제한적으로 사용될 수밖에 없다.

연직배수재를 사용한 진공압밀공법은 점토에 부압을 작용시켜 압밀개량 하는 방법으로서 일반적으로 연직 Drain을 타설하고 Drain 상부를 밀폐시켜 부압을 작용시키는 공법으로 성토재하압밀공법과는 달리 성토재료가 불필요하며, 급격한 재하에 의한 전단파괴의 위험성이 없는 장점에도 불구하고 시공상의 어려움으로 국내외적으로 활발하게 적용되지 못하였으나 최근들어 진공막 설치기술 및 강력한 진공펌프의 등장으로 시공기술이 발전되면서 미국, 유럽, 일본 등지에서 적극적으로 활용되기 시작했고, 국내에서도 광양, 김해 등지에서 연약지반 개량공법으로 적용된 바 있다.

한편, 국내에는 현재까지 적용예가 없는 수평진공배수공법은 점성토를 매립지에 투입기간중, 혹은 투입완료시점에서 배수재를 지반내에 수평으로 매설하여 진공압밀 또는 침투압밀에 의해 지반개량을 하는 것이다. 배수재의 지반내 매설은 종래의 연직배수공법과 같이 압밀배수거리의 단축을 목적으로 부압 또는 침투압밀에 의해 지반개량을 하는 것이다.

그러나 수평진공배수공법의 장점에도 불구하고 아직까지도 많이 사용되지 않는 이유는 수평진공배수공법을 연약지반 개량공법으로이용하는데에는 아직도 해결해야 할 문제가 많이 남아 있기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 부산지역에서 채취한 준설토를 가지고, 단위배수재 모형시험을 통하여 배수재의 직경과 형상변화가 수평진공배수에 미치는 영향에 대해 알아보고자 하였다.

2. 수평진공배수공법

수평진공배수공법은 <Fig. 1>에 도시한 바와 같이 우선 매립 Pond내에 수평으로 배수재를 배치하고 그 위에 준설점성토를 투입한다. 그리고 준설점성토층이 적당한 두께로 되는 단계에서 배수재를 통해 펌프로써 물을 흡입하여 점토층내에 침투수압을 발생시켜 그것을 압밀압력으로서 이용함으로써 준설성토층을 압밀시킨다. 준설점성토를 다시 투입하여 어느정도 퇴적한 후 또다시 배수재를 수평으로 배치하면서 작업을 반복하여 목적하는 층두께까지 매립을 하는 공법이다.

드레인에 의해 연약지반 처리시 적용되는 압밀이론은 Carrillo[1]와 Barron[2]에 의한 샌드드레인에 의한 2차원 방사류에 대한 연구를 시작으로 국내에서는 황 등[5]은 수평배수 진공압밀공법에 대한 지배방정식에 대해 Gibson 등[3]의 1차원 유한변형 압밀이론을 2차원으로 확장시킨 수평배수 압밀이론을 제안하였으며, 김 등[4]은 수평배수공법에 있어서 보다 효과적인 압밀배수의 유도를 위해 해석적 접근방법을 통하여 진공압밀공법을 고찰하고, 진공압에 따른 압밀효과 및 수평배수재의 배치형태에 따른 영향을 분석하였다.

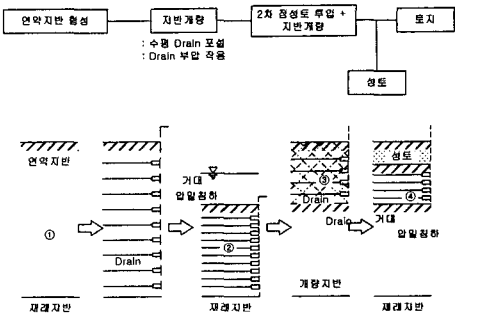


Fig. 1 Application of Horizontal Vacuum Drain

3. 실내 단위배수재 실험

배수재의 직경과 형상에 따른 진공배수공법의 특성변화를 비교분석하기 위하여 배수재의 직경을 변화시킨 원형배수재와 PBD 1본씩을 매설하여 각각의 크기와 형상에 대한 유출유량, 지표침하량 및 간극수압 변화를 측정하였다.

3.1 시료의 물리적성질

본 연구에 사용된 점토는 부산해안지역에서 채취한 준설토로서 기본물성 시험결과는 <Table 1>에 나타난 바와같이 비중 2.71, 액성한계 55.1%, 소성한계 27.5%로 나타났으며 통일분류법에 의한 흙의 공학적 분류는 CH임을 알 수 있다.

Table 1 Summary of Soil Properties

비중 (G_s)	액성한계 (LL)	소성한계 (PL)	소성지수 (PI)	통일 분류법
2.71	55.1%	27.5%	27.6%	CH

한편, 현장에서 채취된 시료의 경우 평균 250%의 초기함수비를 나타내고 있어, 현장조건을 고려하기 위하여 시료의 함수비는 250%로 조절하였다.

3.2 수평배수재

수평배수재는 <Table 2>에서 보는바와 같이 PBD(Mebra Drain)에서 제거한 필터를 전기인두를 이용하여 나일론 튜브나, 아크릴관에 감싼 형태의 원형배수재와 <Fig. 2>에서 보는바와 같이 PBD 한

쪽면을 실험중 흙시료의 유입을 방지하기 위하여 에폭시를 이용하여 폐쇄시키고 반대쪽 끝단은 진공압에 의해 유출되는 간극수를 배수탱크로 연결할 수 있도록 적정 처리후 사용하였으며 총 4가지 종류에 대한 배수재를 사용하였다.

Table 2 Summary of Model Drainage Material

Test	Dimension	Drain Length	Material of Inner Frame	Shape
D6	D=0.6cm	45cm	Uretan Tube	Round
D10	D=1.0cm	45cm	Acrylic Pipe	Round
D25	D=2.5cm	45cm	Acrylic Pipe	Round
PBD	PBD (B=10cm, t=0.5cm)	45cm	Plastic Board	Strip

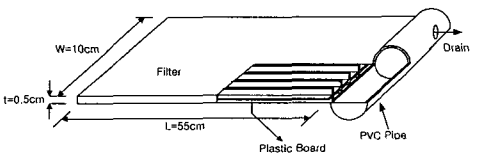


Fig. 2 Model Drain Used in Unit Horizontal Drain Model Test with Vacuum

3.3 토조

실험에 사용된 모형토조는 시료의 침하량을 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴을 사용하였으며 폭 50cm×높이 80cm×길이 60cm의 토조에 높이 50cm까지 흙시료를 채우고 실험을 수행하였다.

진공배수실험의 경우 동일 진공압력 조건에서 필터와 흙의 투수계수의 지배를 받을 것으로 판단되므로, 실험과정에서 배수라인의 영향으로 인하여 실제 유출유량보다 작게 측정되지 않기 위하여 측정되는 배수재로부터 유출된 간극수를 배수탱크로 연결해주는 배수라인의 통수능(Discharge Capacity)은 시험조건 이상의 통수능을 확보해야 한다. 따라서, 배수라인의 통수능의 영향이 미치지 않는 조건에서 소정의 실험을 수행할 수 있는 한계상태를 확인하기 위하여, 단위배수재 실험조건에서 배수재를 제거하고 흙시료 대신 물을 채워 배수라인의 통수능시험을 수행하였다. 실험결과 <Table 3>에서와 같이 배수라인의 경우 평균 2.23 ℓ/min.의 통수능을 확보하고 있는 것으로 확인되었다. 위 결과에 의하면 단위배수재 실험조건에서는 2.23 ℓ/min.이상의 유출유량은 배수라인의 통수능 한계로 인하여 측정할 수 없는 것으로 확인되었다.

Table 3 Discharge Capacity of Drain System in Unit Horizontal Drain Model Test with Vacuum

Minimum Discharged Area in Drain System	Discharge Capacity of Drain System(ℓ/min.)			
	1	2	3	Ave.
0.126(cm^2)	2.22	2.24	2.22	2.23

배수재의 크기와 형상에 따른 진공배수공법의 특성변화를 분석하기 위하여 <Fig. 3>에서와 같이 폭 50cm×높이80cm×길이 60cm의 토조에 높이 50cm까지 흙시료를 채우고 시료 중앙부에 길이 55cm의 배수재를 각각 설치하여 실험을 실시하였다. 배수재 중간 하부에 간극수압 측정용 팁(Tip)을 설치하여

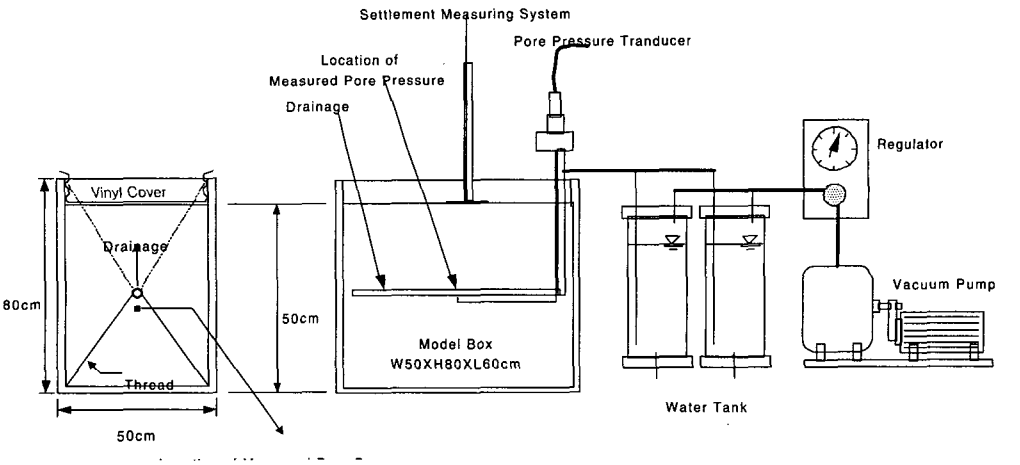


Fig. 3 Schematic of Unit Horizontal Drain Model Test with Vaxuum

배수재와 인접한 부분에서 작용하고 있는 부압의 변화량을 측정하도록 하였다. 또한 배수재는 초기에 위치를 고정하기 위하여 그림에서 보는바와 같이 실을 이용하여 X형으로 고정하였으며, 시료투기시 이미 설치된 배수재 위치에 영향을 주지 않기 위하여 슈트를 이용하여 흙을 채운 후에 상부의 실을 제거하여 진공배수에 의해 침하가 유발되도록 유도하였다. 또한 실험과정에서 상부 균열면 발생으로 인한 진공압 누출 가능성을 배제하기 위하여 상부에 비닐커버를 씌워 누출에 의한 진공압 변화 가능성을 최소화하였다.

3.4 계측

물로 포화된 직경 6mm의 Uretan Tube를 사용하여 배수재 중앙 내부에 설치된 팁(Porous Tip)을 외부에 설치된 6개의 간극수압계에 각각 연결시켜 매 10분 마다 UPC-600 Data Interface를 통하여 배수재 주변 준설토의 간극수압을 계측하였다. 또한 수평배수재를 통하여 배수되는 유출유량을 2개의 배수탱크(용량; 4.5 ℓ)를 번갈아 사용하여 계측하였으며 지표면 및 수평배수재의 침하는 <Fig. 3>에 나타낸 바와 같이 비닐커버 상단에 지표침하계를 설치하여 간극수 유출에 의해 유발되는 지표침하량을 지속적으로 계측하였다.

한편, 실험 종료직후 토조를 양분하여 한쪽 구역 중앙단면에서 좌우 50mm 수평간격으로 직경50mm 높이 100mm의 Vane을 사용하여 현장 비배수전단강도시험을 실시하였고 함수비 분포를 측정하기 위하여 상부에서부터 시료를 해체하여 들어 가면서 중앙단면을 기준으로 좌우 50mm 수평간격으로 깊이별 함수비를 측정하였다.

4. 실험결과분석

4.1 간극수압 및 진공압력

실험기간 동안에 진공펌프의 부압은 최대 -8.0t/m^{2}을 유지하였다. <Fig. 4>에 나타낸 바와 같이 배수재 하부에 작용하는 진공압은 PBD, 25, 10, 6mm순으로 진공압이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이것은 간극수압 측정용 팁 주변의 배수재 크기에 의한 진공포텐셜의 차이에 의해 진공압이 서로 다르게 측정된 것으로 추정된다.

4.2 배수량

배수량 측정결과를 시간경과에 따라 누적배수량으로<Fig. 5>에 나타내었다. 측정결과 4개의 수평배수재에서 각각 배수된 유출유량은 PBD, 25, 10, 6mm 순으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 배수재의 직경이 증가할수록 배수재 주변과 접촉하는 표면적이 증가함에 따라서 배수량이 증가하는 것이다. <Fig. 6>의 유출유량을 배수재의 표면적으로 나눈 단위면적당 유출유량 관계에서는 정반대의 결과가 도출되었다. 이러한 결과로 보아 배수재 직경이 작을수록 단위면적당 배수효율은 증가함을 알 수 있다.

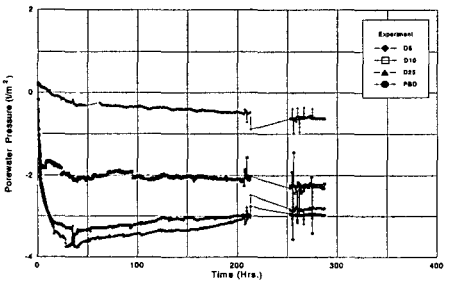


Fig 4 Change of Porewater Pressure with Time

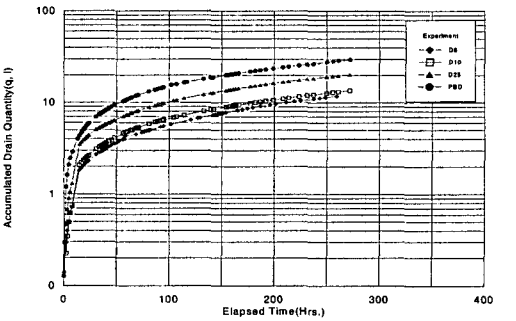


Fig. 5 Accumulated Drain Quantity with Time

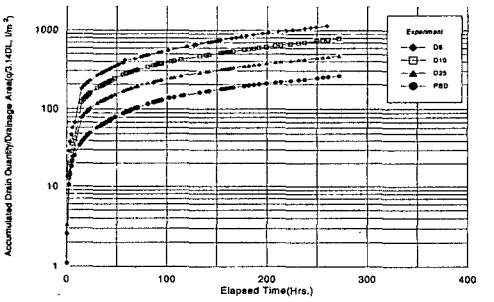


Fig. 6 Accumulated Drain Quantity per Unit Surface Area of Drain with Time

<Fig. 7>은 시간경과에 따른 배수율(분당배출량)을 나타낸 것으로 D6, D10, D25, PBD의 배수재에서 시험초기에는 0.10, 0.12, 0.23, 0.53 ℓ/min의 배수율을 보여주고 16.6의 경과 시간후에는 0.06, 0.06, 0.11, 0.18 ℓ/min로 급격히 감소후 259시간 경과시에는 0.036, 0.042, 0.050, 0.089 ℓ/min의 값을 나

타내고 있다.

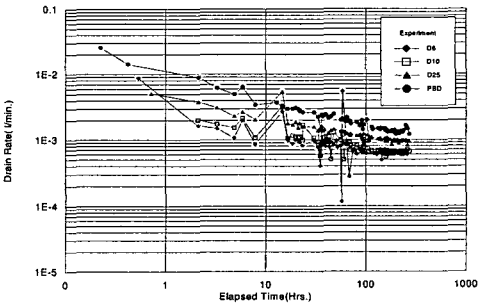


Fig. 7 Drain Rate with Time

4.3 지표면 및 수평배수재의 침하

지표침하량 측정결과를 <Fig. 8>에 도시하였다. 유출유량이 상대적으로 많은 PBD에 대한 실험결과에서 지표침하량이 크게 유발되는 것으로 나타났다. 실험초기 진공압 유지를 위해 설치한 비닐막 위에 지표침하계를 설치하였으나 실험이 진행되는 과정에서 비닐막과 지표사이에 자중압밀에 의해 형성된 것으로 추정되는 배수층이 형성되어 정확한 지표침하량을 측정할 수 없어 지표침하량은 토조 벽면에 스케일을 부착하여 계면 변화량을 측정한 값을 사용하였다.

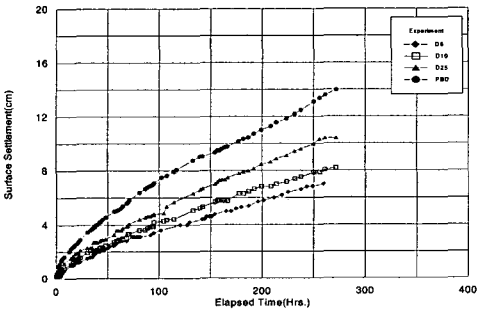


Fig. 8 Surface Settlement with Time

지표침하량 결과를 이용하여 모형지반의 체적변형량을 산정한 결과를 <Fig. 9>에 나타내었다. 모형지반의 체적변형량의 변화는 완전포화된 지반으로 가정시 자중압밀없이 침하가 진공압에 의한 배수가 발생하였다면 그의 변화는 측정된 누적배수량과 같음을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이 지표침하량에 의해 산정된 체적변형량은 200시간 경과시 14.5~27.5 l가 발생한 것으로 나타나 <Fig. 6>의 유출유량결과에 비해 약 16.5~51% 이상 크게 나타난다. 이것은 자중압밀에 의한 침하가 유발되어 실제 침하량이 커지는 것으로 추정된다. 이와같은 결과는, 진공압을 가하는 동안 침하는 배수재를 통한 압밀과 지표면을 통한 자중압밀로 구성되어 있는바, 배수재의 배수면적이 클수록 배수재를 통한 압밀의 효과가 커지기 때문으로 판단된다.

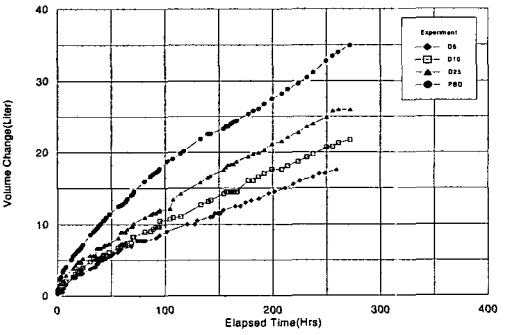


Fig. 9 Volume Change with Time

Table 4 Difference of Accumulated Drain Quantity from Volume Change at 200 hrs.

Test	Accumulated Drain Quantity(l)	Volume Changes (l)	Difference (%)
D6	9.6	14.5	51
D10	10.7	15.7	47
D25	16.2	21.1	30
PBD	23.6	27.5	16.5

4.4 강도분포(콘저항치)

유출유량 측정후 토조 중앙을 기준으로 좌우 5cm간격으로 총 10회씩의 콘관입시험을 실시하여 배수재 주변에서의 콘저항치 분포를 <Fig. 10>~<Fig. 13>에 나타내었으며, 배수재를 중심으로 상부, 좌 우측부분의 거리별 콘저항치 관계를 <Fig. 14>~<Fig. 17>에 나타내었다. 각각의 시험조건에 따른 콘저항치 분포는 배수재를 중심으로 반경에 따라 등분포하고 있는 것으로 나타났다. 거리별 콘저항치의 경우 초기 5cm이내에서 급격히 감소하는 경향을 보이며 이후 10cm까지 완만하게 감소하다가 10cm이후에는 0.02kg/cm^{2}이하의 콘저항치 분포를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 배수재와 흙시료 경계면에서의 콘저항치는 PBD(0.76kg/cm^2), 25mm(0.72kg/cm^2), 10mm(0.26kg/cm^2), 5mm(0.17kg/cm^2)순으로 나타났으며, 콘저항치와 베인시험에 의한 비배수 전단강도의 상관관계를 사전에 조사한 결과 1/10의 상관관계를 보이고 있는 바,

배수재 주변에서의 비배수전단강도는 0.17~0.76t/m^{2}의 크기를 보이는 것으로 나타났다.

6mm와 10mm 배수재 주변에서의 콘관입저항치는 PBD와 25mm 배수재 주변에서의 콘저항치보다 작게 나타났는데, 이것은 구근이 상대적으로 작게 형성된 6mm와 10mm 조건에서 콘관입시 콘관입저항에 의해 배수재 구근이 함수비가 높은 주변지층으로 유동이 발생됨에 따라 콘저항치가 작게 산정된 것으로 추정된다.

<Fig. 14>와 <Fig. 15>에 보인바와 같이 콘저항치는 배수재로부터 떨어진 거리에 따라서 급격한 기울기가 감소하는 경향을 보이며 배수재로부터 약 5cm (D6 인경우에는 직경 8.3배, D10 인 경우에는 직경의 약 5배) 떨어진 지점부터 매우 낮은 저항치를 보여주고 있다.

<Fig. 16>의 D25 실험에서 측정한 콘저항치는 거리에 따라 저항치가 감소하고 있으며 대체적으로 배수재로부터 5~10cm (직경의 2~4배) 떨어진 거리에서 강도가 급격히 저하되고 있음을 알 수 있다.

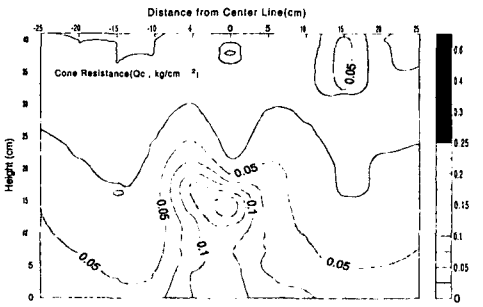


Fig. 10 Distribution of Cone Resistance around Drainage(Test D6)

<Fig. 10> Distribution of Cone Resistance around Drainage (Test D6)

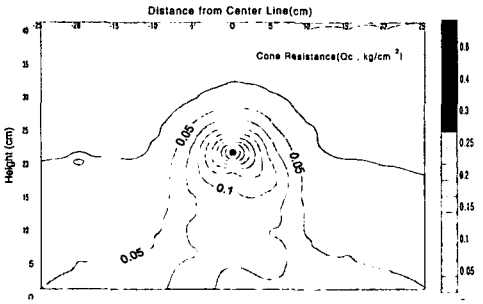


Fig. 11 Distribution of Cone Resistance around Drainage(Test D10)

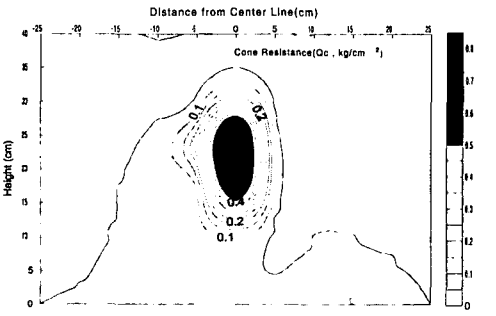


Fig. 12 Distribution of Cone Resistance around Drainage(Test D25)

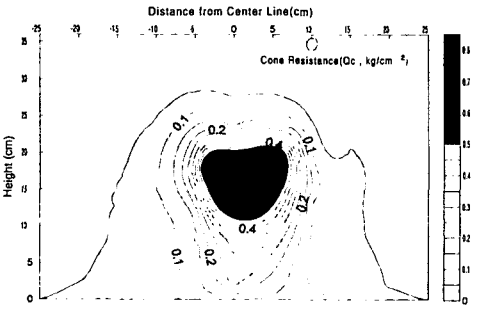
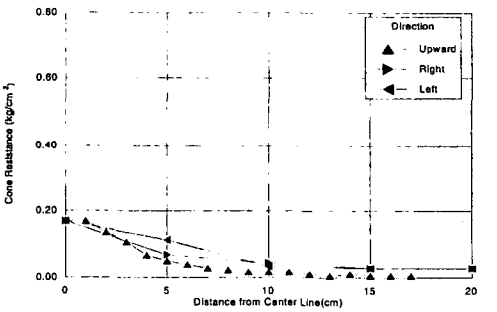


Fig. 13 Distribution of Cone Resistance around *Drainage(Test PBD)*



<Fig. 14> Distribution of Cone Resistance around Drainage(Test D6)

<Fig. 17>의 PBD 설치시 콘저항치를 보면 배수재 표면에서부터 강도의 변화가 포물선 함수형태로 급격히 강도가 감소하고 있음을 알 수 있으며 배수재로부터 80cm 떨어진 위치에서부터는 매우 낮은 콘저항치를 보여주고 있음을 알 수 있다. 좌·우측

의 수평방향에 대하여는 자료의 분산을 보이기는 하나 대체적으로 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

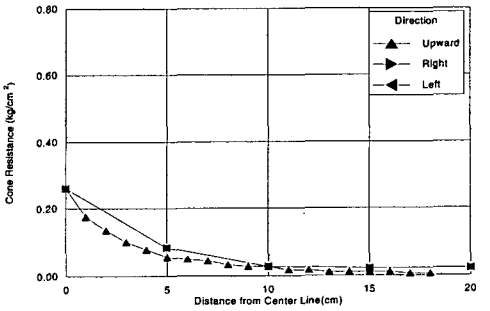


Fig. 15 Distribution of Cone Resistance around Drainage(Test D10)

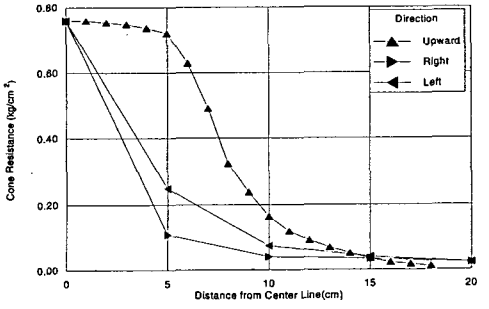


Fig. 16 Distribution of Cone Resistance around Drainage(Test D25)

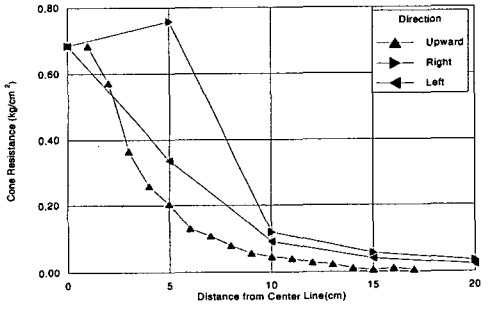


Fig. 17 Distribution of Cone Resistance around Drainage(Test PBD)

4.5 함수비 분포

콘관입시험을 수행한 후 토조 해체를 통한 위치별 심도별 함수비 분포를 측정하여 배수재 주변에서의 함수비 분포를 <Fig. 18>~<Fig. 21>에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 <Fig. 21>의 Strip의 형태의 PBD를 제외하고 원형의 배수재를 사용한 경우에는 함수비 분포가 배수재를 중심으로 원형의 등고선을 나타내고 있음을 알 수 있다.

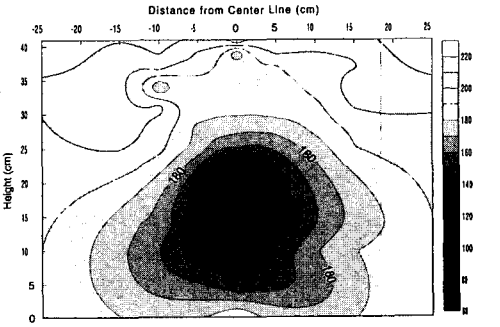


Fig. 18 Distribution of Water Content around Drainage(Test D6)

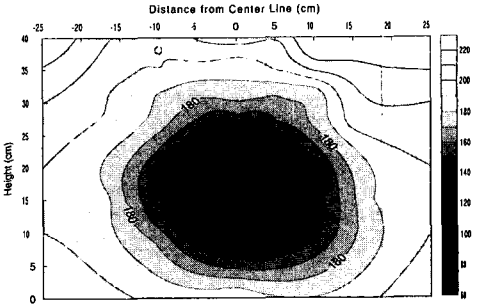


Fig. 19 Distribution of Water Content around Drainage(Test D10)

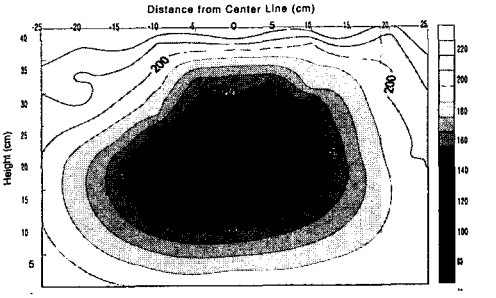


Fig. 20 Distribution of Water Content around Drainage(Test D25)

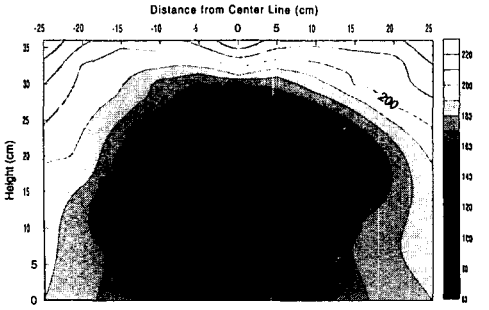


Fig. 21 Distribution of Water Content around Drainage(Test PBD)

<Fig. 22>는 D = 0.6cm 의 배수관을 사용한 경우 배수재 표면에서부터 떨어진 거리에 대하여 함수비 변화를 나타낸 것으로 배수재를 중심으로하여 상향방향과 좌·우 방향에 대하여 방향과 관계없이 대체적으로 거리에 비하여 함수비가 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 배수재 표면 가까이에서는 약 90%의 함수비로 액성한계(LL=80.1%)보다 약간 큰 함수비를 가지고 있으며 대체적으로 거리에 대하여 선형적으로 함수비가 증가하고 있음을 알수 있다. 2.5cm 의 배수재를 사용한 경우에도 이와 매우 유사한 경향을 보여주고 있음을 <Fig. 23>과 <Fig. 24>에 각각 보여주고 있다.

<Fig. 25>의 PBD를 사용한 경우에는 수평방향에 대한 함수비 분포는 원형의 배수재를 사용한 경우와 유사한 함수비 분포를 나타내고 있으나 상향방향에서는 배수재 근처에서도 높은 함수비분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 배수재 상단부내 균열이 발생하여 유로가 형성되어 있음을 고려할 때 유로 형성에 의한 높은 함수비를 보여준 것으로 판단된다.

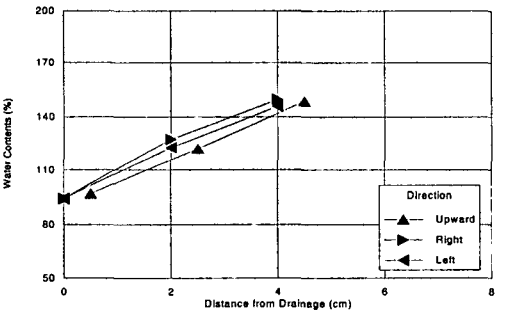


Fig. 22 Distribution of Water Content to the Distance from Drainage (Test D6)

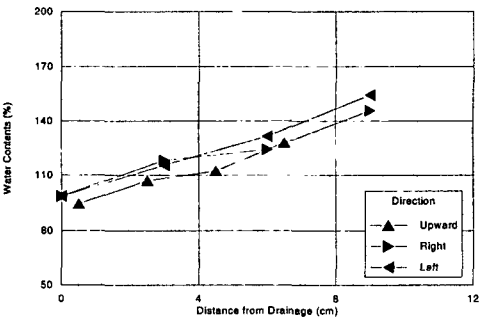


Fig. 23 Distribution of Water Content to the Distance from Drainage(Test D10)

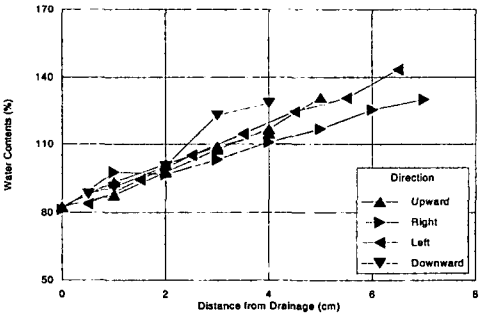


Fig. 24 Distribution of Water Content to the Distance from Drainage(Test D25)

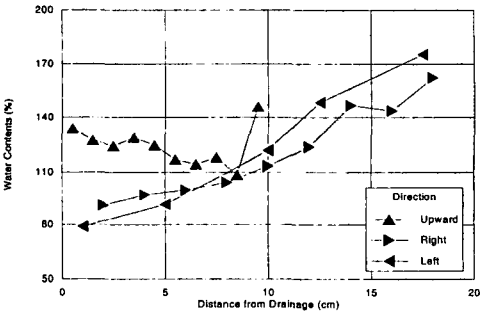


Fig. 25 Distribution of Water Content to the Distance from Drainage(Test PBD)

5. 결론

1) 직경이 다른 배수재(D=0.6, 1, 2.5cm)와 PBD(B=10cm, t=0.5cm)에 대한 진공 배수 모형 실

험 결과, 진공압의 배수재 주변 지반에 전달되는 영역 및 크기는 배수재의 단면적 크기에 따라서 단면적이 증가할수록 그 크기가 증가하는 것으로 나타났다.

2) 배수량의 크기는 배수재 단면적 크기에 따라서 증가하는 경향을 보이나 단위면적당 배수효율은 감소하는 경향을 나타내었다.

3) 시간당 배수량은 배수재의 단면적이 클수록 빠른 속도로 감소하며 이것은 배수재의 단면적 증가에 따라 배수량의 증가로 인하여 진공 배수 공법에 의한 압밀효과가 빠른 속도로 진행되기 때문이다.

4) 시간 경과에 따른 지표면 침하는 배수재 단면적의 증가에 따라 배수량의 증가로 인하여 커지는 경향이 있음을 확인하였으며 측정된 진공압에 의한 배수량에 비하여 침하량 기준 환산배수량이 크게 나타나며 그 차이는 배수재 단면적이 증가할수록 감소하는 경향을 보이는 것은 매립지반 표면과 배수재 사이의 지층에서 발생하는 자중 압밀에 의한 영향과 배수재 단면적 증가에 따라 진공 배수 침투압에 의한 압밀 침하량이 증가하기 때문으로 판단된다.

참고문헌

[1] Carrillo, N., "Simple Two and Three Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils", *Jour. Math. Physics*, Vol.21, pp.21~31, 1942.

[2] Barron, R. A., "Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells", *Trans. A. S. C. E*, No.113, pp.718~754, 1984.

[3] Gibson, R. E., England, G. L. and Hussuy, M. J. L., "The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clay I : Finite Non-linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers", *Geotechnique*, Vol. 17, pp. 261-273, 1967.

[4] 김홍택, 김석열, 윤창진, 강인규, 김창겸, "수평배수재를 이용한 진공압밀공법의 해석에 관한 연구", *한국지반공학회 2000년 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회*, pp.520-527, 2000.

[5] 황정규, 김홍택, 김석열, 강인규, 김승욱, "플라스틱 배수재를 이용한 수평배수공법에 관한 연구", *한국지반공학회지*, 제 14권, 제 6호, pp.93-112, 1998.