

오염토양 복원을 위한 연직배수시스템의 지반공학적 특성

Geotechnical Characteristics of Prefabricated Vertical Drain System for Contaminated Soil Remediation

신은철¹⁾ · 박정준[†]

Shin, Eunchul · Park, Jeongjun

ABSTRACT : The quantity of noxious wastes generated by the growth in industrialization and population in all over the world and its potential hazards in subsurface environments are becoming increasingly significant. The extraction of the contaminant from the soil and movement of the water are restricted due to the low permeability and adsorption characteristics of the reclaimed soils. Incorporated technique with PVDs have been used for dewatering from fine-grained soils for the purpose of ground improvement by means of soil flushing and soil vapor extraction systems. This paper is to evaluate several key parameters that affected to the performance of the PVDs specifically with regard to: well resistance of PVD, zone of influence, and smear effects. In the feasibility of contaminant remediation was evaluated in pilot-scale laboratory experiments. Well resistance is affected on the vertical discharge capacity of the PVDs under the various vacuum pressures. The discharge capacity increases consistently in areal extents with higher applied vacuum up to a limiting vacuum pressure. The head values for each piezometer at different vacuum pressures show that the largest head loss occurs within 14 cm of the PVD. Air flow rates and head losses were measured for the PVD placed in the model test box and the gas permeability of the silty soils was calculated. Increasing the equivalent diameter results in a decrease in the calculated gas permeability. It is concluded that the gas permeability determined over the 1,500 to 2,000 cm^3/s flow rates are the most accurate values which yields gas permeability of about 3.152 Darcy.

Keywords : Contaminated soil remediation, Gas permeability, Prefabricated vertical drain system, Soil vapor extraction, Soil flushing, Radius of influence

요 지 : 개발사업과 산업발달로 인하여 발생하는 유해화학물질과 유류사용량이 늘면서 화학물질과 유류를 저장하는 지하저장탱크에서의 오염물질 유출로 토양 및 지하수 오염이 심각해지고 있다. 또한, 산업지역, 공장지대가 밀집된 매립 지반에서는 투수계수가 낮아 오염물질 추출에 한계가 있다. 이러한 문제해결 방안의 하나로 연약지반 개량공법에서 사용되고 있는 연직배수재를 이용하여 기존의 복원기술인 진공추출공법, 토양세정공법의 효율을 증진시킨 연직배수시스템에 대한 연구를 수행하였다. 오염된 토양의 복원을 목적으로 사용한 연직배수시스템의 적용성 평가를 위하여 오염토양 복원시 오염지반에 영향을 주는 인자에 대한 지반공학적 특성 등을 분석하였다. 연직배수재의 수두손실 및 통수능 측정 결과, 진공압력과 연직배수재의 폭이 증가할수록 통수능은 배수재의 통수 단면적에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 축적효과에 의해 단면을 축소시킨 폭이 2.5cm인 배수재의 경우에는 영향반경이 대략 14cm에서 16cm를 넘어가면서부터 간극수압이 더 이상 감소하지 않고 일정해지는 유효 영향범위로 판단하였다. 또한, 투기계수는 증가직경이 증가 할수록 감소하였으며, 흐름률이 높을수록 압력수두는 더 정밀한 값을 나타내어 평균 투기계수 값인 3.152 Darcy에 가까운 공기흐름률은 1,500~2,000 cm^3/s 일 때 가장 정확한 값을 나타내었다.

주요어 : 오염토양 복원, 투기계수, 연직배수시스템, 토양증기추출기술, 토양세정기술, 영향범위

1. 서 론

토양은 인간이 살아가는 터전이고 개발사업이 수행되는 원천적 환경매체로서 매우 중요한 자원이다. 최근, 전세계적으로 인구증가 및 산업 발달로 발생하는 폐기물과 유해화학물질로 인하여 토양 및 지하수 오염의 심각성이 고조되어 개발사업으로 영향 받게 되는 토양환경에 대한 중요성이 대두되고 있다. 특히 지속적인 경제발전과 소득수준

이 향상되면서 산업활동과 더불어 자동차 보급으로 인한 유류사용량이 크게 증가하였다. 이에 따라 주유소의 유류 저장탱크 및 화학물질을 저장하고 있는 산업시설에서의 지하저장탱크에서 비수용상액체(NAPLs)로 분류되는 유류 및 유해화학물질의 유출로 인한 토양 및 지하수 오염 문제가 부각되고 있다(고석오, 2002).

오염토양 복원기술의 종류는 매우 다양하게 개발되어 실용화되고 있다. 토양세정기술, 토양증기추출기술, 양수처리

1) 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수

† 정회원, 인천대학교 공학기술연구소 선임연구원(E-mail : frostjun@incheon.ac.kr)

기술, 바이오벤팅기술 등이 오염지역의 현장복원기술로 많이 사용되고 있다. 이들 기술은 주로 조립지반에 사용되거나 불포화 지반에 사용되는 것으로서 시가지, 산업지역, 공장지대가 밀집된 고농도의 중금속 및 유해물질이 함유되어 있는 투수성이 낮은 매립 지반에서는 유체의 전송 및 오염물질 추출에 어려움이 있다. 특히 매립지반의 간극은 매우 작기 때문에 세척제가 토양 속으로 주입되거나 추출되는 데 한계가 있고, 생물학적 처리기술의 경우에도 오염지역 내로 영양소를 주입하는 데 어려움이 있다. 따라서 오염된 매립지반 현장에서 이들 공법을 적용할 때에는 상기 기술된 문제점을 개선할 수 있는 방안이 강구되어야 한다(정하익, 2003).

이러한 문제해결 방안의 하나로 Collazos et al.(2002), Quaranta et al.(2005)은 기존의 연약지반 개량공법에서 널리 사용되고 있는 토목섬유 연직배수재(prefabricated vertical drains)를 활용하여 연직배수시스템에 대한 연구를 수행하였다. 즉, 조립지반에 많이 사용되고 있는 복원기술인 토양세정공법과 토양증기추출공법과 유사한 시스템으로서 매립지반 내에서 물과 공기의 주입 또는 추출 지점과 오염토 또는 간극수 지점과의 이동 시간을 짧게 하여 물 또는 공기를 추출하는 데 걸리는 시간을 최소화 하였다(신은철 등, 2005; 정하익, 2003; Welker et al., 1998). 또한, 연직배수시스템은 다수의 주입배수재와 추출배수재를 설치함으로써 포켓상으로 분포하고 있는 오염물질을 신속하게 제거할 수 있다.

따라서, 이 논문은 포화지반에서 토목섬유 연직배수재를 이용한 토양세정 복원시스템 적용시 일정수두를 유지할 수 있는 추출시스템을 도입함으로써 오염토양복원 과정에서 발생하는 배수저항, 영향범위, 스미어효과, 등가직경 등의 영향인자에 대한 지반공학적 특성을 도출하였다. 또한 불포화 지반에서의 토양증기추출 복원시스템 적용시에 앞선 토양세정 복원시스템에서 도출된 기본적인 연직배수재의 거동 특성을 효율적으로 적용하였다. 즉, Theis(1935)가 제시한 축척효과에 따라 단면을 축소시킨 연직배수재를 적용하여 진공추출시 흐름률과 투기계수와와의 관계를 분석하였고, 각각 다른 다짐 및 함수비에 따른 배수재의 주입추출률과 그 효율성을 평가하였다.

2. 연직배수재를 이용한 토양오염 복원 시스템 개념

연직배수재는 물 혹은 공기를 현장지반과 지하수로 이동시켜 진공조건 상태에서 오염된 공기와 물을 추출하여 오염토양을 복원시키는 매체이다. 오염수나 오염가스의 추출은 연직배수재 상부에 관을 연결시킨 관망을 통해 진공압력을

가하여 추출할 수 있다. 연직배수재의 주입과 추출 흐름은 복원과정 동안 매체의 질량평형이 유지되어야 하지만 흙의 압밀로 인하여 간극률이 감소하게 되고, 흙의 투수계수 및 투기계수가 저하되어 복원시 소요되는 시간이 더 길어질 수도 있다. 즉, 연직배수재를 이용하여 한층 더 발전된 연직배수시스템의 매카니즘은 지반개량을 목적으로 사용된 연직배수공법의 설계와 유지관리를 기초로 하고 있다.

토목섬유 연직배수재를 이용한 토양세정시스템의 적용은 1995년 미국 버지니아대학에서 연직배수재에 주입과 진공추출을 병행하여 복원효과와 적용성에 대하여 소개된 바 있다. Bowders and Gabr(1995)는 연직배수재를 이용하여 토양세정공법을 적용시켜 오염토양복원의 현장적용성을 평가하였다. 즉, 기존 적용된 토양세정공법 적용시 세립질 지반에서의 작은 간극을 세정제가 전달되는 데에는 한계가 있기 때문에 복원 효율이 떨어져 연직배수재를 이용하여 오염된 토양을 복원함으로써 세립질 지반에서 토양세정기술의 효과를 실험적으로 규명하였다.

Gabr et al.(1996)은 모형실험과 파일럿 규모의 실내실험을 통하여 배수재의 투수특성을 제시하였고, 오염회수토조를 제작하여 실험 및 수치해석을 실시하였다. Quaranta et al.(1997)은 오염된 세립지반에 연직배수재를 적용시켜 배수재 영역내에서의 영향과 파일럿 규모의 오염복원 실험을 수행하였다. Welker et al.(1998)은 배수재 설치 간격, 배수저항 및 배수재와 화학물질의 반응에 대한 연구를 수행하였으며, Long and Covo(1994)는 배수재의 등가직경 산정식을 제안하였는데, 이는 Hansbo(1981)가 제안한 방정식보다 작은 등가직경 수치를 나타내었다. 또한, Gabr et al.(1999)은 오염지반 및 지하수 복원시 오염물질과의 접촉에 의하여 배수재의 막힘현상에 대하여 시간에 따른 지오텍스타일 필터의 통수성 및 인장강도, 배수재의 압축거동 특성을 파악하였다.

Collazos et al.(2003)은 불포화영역에서의 연직배수재를 이용한 유기화합물 제거 효과 실험을 수행하여 공기흐름경로가 짧아져 오염제거시간을 신속하게 할 수 있고, 주입배

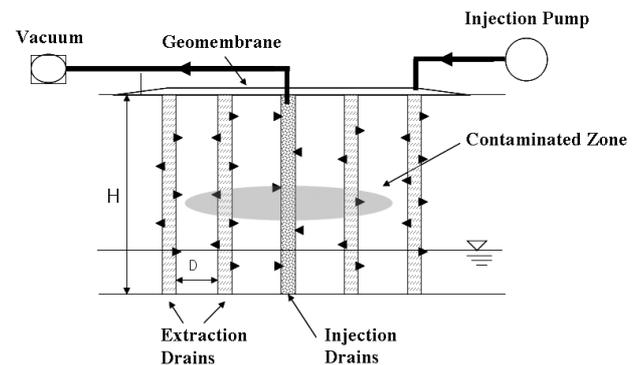


Fig. 1. Concept of soil vapor extraction with PVDs

수재와 추출배수재의 개수를 증가시킴으로서 포켓상으로 구성된 오염지역에서 오염물질의 제거효율을 확인하였다.

Fig. 1은 토목섬유 연직배수재를 이용하여 기존 오염토양복원기술인 토양세정기술과 토양증기추출기술을 적용한 연직배수시스템 중 불포화지역에서 오염토양 복원에 적용되는 토양증기추출 복원시스템의 개념도를 나타낸 것이다.

3. 토양세정복원시스템 적용시 지반공학적 특성

일정수두 혹은 진공추출 시스템을 도입하여 연직배수재의 내적 저항, 배수저항, 그리고 연직 통수능력에 대한 효과를 나타내었다. 진공 추출시 연직배수재의 수두손실을 파악하기 위하여 각각 다른 진공압력조건하에서 연직배수재 코어의 길이와 폭을 달리하여 각각의 조건마다 수두손실 및 공기흐름률과 통수능을 측정하여 비교 분석하였다. 또한, 기존의 토목섬유 연직배수재를 이용하여 오염토양 복원시 고려해야 할 주요 영향인자인 영향범위, 등가직경, 스미어 효과에 대하여 실험을 수행하였다.

3.1 배수저항

지반내에 압밀이 진행됨에 따라 연직배수재 내부로 간극수의 유입이 발생하여 이 간극수가 드레인재 내에서 연직으로 흐를 때 배수능력을 저하시키는 요인을 통틀어 배수저항이라고 한다. 즉, 측방토압에 의한 코어 내 흐름통로의 체적감소와 지반침하에 따른 배수재의 변형 및 굴곡, 배수재 구조상의 내구성 및 내열화성에 따른 재료성능 감소 등 여러 가지 요인에 의한 영향을 받아 통수능력이 감소하게 되는 것이다. 따라서, 이 논문은 연직배수재가 실제 지반에 타설된 다음 진공압에 의해 지반내에 있는 간극수가 배수재 내로 침투되고, 침투수는 배수재 내부를 흐르게 되어 배수재내의 내부저항, 즉 배수저항은 진공압을 가했을 때 연직배수재의 통수능 영향을 고려하여 실험을 수행하였다. 실험 과정은 연직배수재 코어에서 발생하는 통수능과 지오택스타일 필터를 통한 평면흐름상태에서 전수성을 고려하여 실시하였다.

3.1.1 실험 방법 및 내용

Fig. 2는 높이 100cm, 직경 20cm인 실린더 형태의 압력조절장치를 나타내고 있다. 상부와 하부의 덮개는 강철판으로 하였고, 실린더는 실험 수행시 정확한 물의 양을 측정할 수 있도록 아크릴 재료를 이용하여 제작하였다. 압력이 주어졌을때 실린더의 변형을 방지하기 위해 직경 7

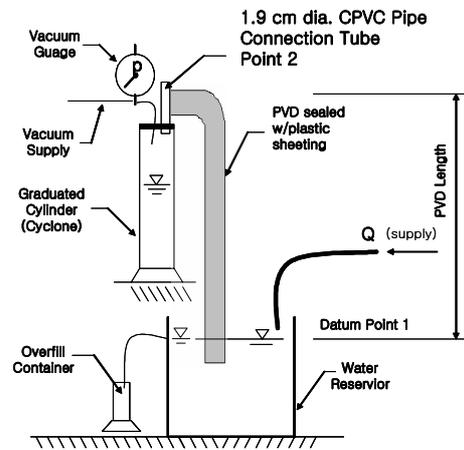


Fig. 2. Well resistance apparatus (Gabr et al., 1996)

mm의 철재봉 6개로 보강하였다. 이 장치는 브로워에서 공급되는 기압을 수압으로 바꾸어 주는 역할을 하며, 상부에 기압을 조절할 수 있는 게이지를 부착하여 수압을 조절할 수 있도록 하였다.

각각의 실험 순서에 따라 연직배수재의 폭을 2.5, 5.0, 10cm로 축소 제작하여 수행하였다. 각각의 단면이 축소된 연직배수재에 대하여 Gabr et al.(1996)은 진공상태에서 수두손실을 산정하기 위하여 배수저항 실험을 실시하였고, 진공으로 추출하는 동안 흐름속도의 함수로서 단위길이당 수두손실의 향으로 배수저항을 정량화 하였다.

배수재 상부를 불투수성 슈트로 도포한 후 연직배수재의 길이방향으로 발생하는 진공손실과 공기 투과를 최소화하기 위하여 실리콘으로 부착시킨후 테이프를 실링을 하였다. 실험 순서는 우선 실험 수조에서 물을 공급하면서 통수량 측정 준비를 하고, 각각의 실험종류에 따라 진공압을 가한 후, 지속시간마다 배수재로부터 통수량을 측정하여 보정하였다. 최종적으로 공기압력을 증가시키면서 진공압이 주어진 기준에 도달하게 되고 실험이 종료될 때까지 실험조건에 따라 반복하여 수행하였다.

3.1.2 실험결과 및 분석

Fig. 3은 각각 연직배수재 폭이 2.5, 5.0, 10.0cm 일 때 진공압력과 통수능력과의 관계를 도시한 것이다. 연직배수재의 길이가 3, 4, 5m 일 때에 대하여 10kPa 만큼의 진공압력을 증가시키면서 실험을 수행하였다. 실험 결과, 진공압력과 연직배수재의 폭이 2.5, 5.0, 10cm로 증가할수록 통수능은 배수재의 통수 단면적이 각각 1, 2, 4cm²에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 연직배수재는 폭과 길이의 종류에 따라 최소 공기흐름률 상태에서 연직배수재로부터 추출된 최대 통수능은 같은 경향을 나타내고 있다.

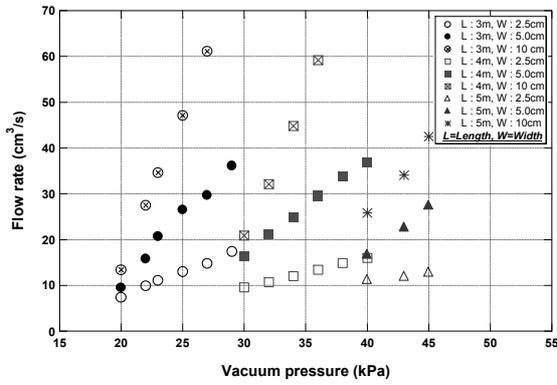


Fig. 3. Flow rate as vacuum pressure

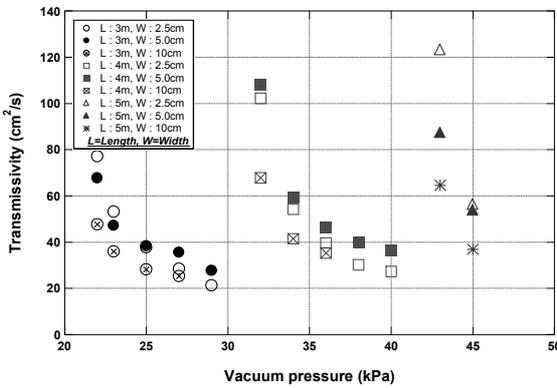


Fig. 4. Transmissivity as vacuum pressure

베르누이의 에너지 방정식을 기초로 진공상태에서 수두 손실을 산정하기 위하여 식 (1)에 제시된 바와 같이 진공으로 추출하는 동안 흐름속도의 함수로서 단위길이당 수두손실의 향으로 배수저항을 정량화 하였다. 따라서 수두손실과 통수능 관계는 폭과 길이의 변수로서 연직배수재의 폭에 따라 일정하게 나타났다.

$$Hf_{PVD} = - \left[\frac{p_2}{\gamma_w} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right] \quad (1)$$

즉, 진공압력에 따른 배수저항을 나타내기 위하여 층류 흐름시의 레이놀즈수, 각각의 폭과 길이에 따른 마찰계수와 수두손실을 결정한 후, 연직배수재의 전수성과 진공압력의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

결과, 진공압력이 커질수록 폭과 길이에 따른 마찰계수 값이 커지고, 마찰계수에 따라 수두손실이 증가하여 연직배수재의 배수저항이 커지므로 전수성은 주어진 압력까지 감소하였다.

3.2 영향범위와 스미어효과

연직배수재의 영향범위 평가는 토양세정 복원시스템 적용시 현장 설계를 함에 있어 연직배수재의 배치 형태의 기

준을 수립하는데 목적을 두고 있다(신은철, 2005). 영향범위의 측정은 추출을 위한 진공압이 가해졌을 때 원추형의 부압 영역의 면적 확장 특성을 나타내고, 주입시 발생하는 원추모양의 부풀어 오르는 것을 평가하기 위해 실시하였다. 또한, 등가직경은 밴드형태의 연직배수재를 원형 형태로 환산하여 나타낸 직경으로서 등가직경의 산정은 연직배수재에 작용되는 주요 영향 인자들을 도출하는데 반드시 필수적이다.

3.2.1 실험방법

본 논문에서 사용된 시료는 실트질 흙으로서 공학적 특성은 Table 1에 나타내었고, 입도분포곡선은 Fig. 5에 나타내었다. 입도분포곡선에 나타난 바와 같이 실트질 흙의 구성은 70%이상의 가는 모래질 입자와 30% 정도의 실트 및 점토분을 함유하고 있고, 세립토분의 대부분은 실트질로 구성되어 있으므로 통일분류법의 분류기호로 SM인 실트질 모래로 나타났다. 실트질 흙의 표준다짐시험 결과는 최적함수비가 16.4%, 최대건조밀도는 $14.9kN/m^3$ 을 나타내었고, 투수계수는 $3.61 \times 10^{-4} cm/s$ 로 도출되었다.

연직배수재의 영향범위와 스미어 효과에 대한 실험적 연구를 위해 모형토조 실험장치를 이용하였다. Fig. 6은 모

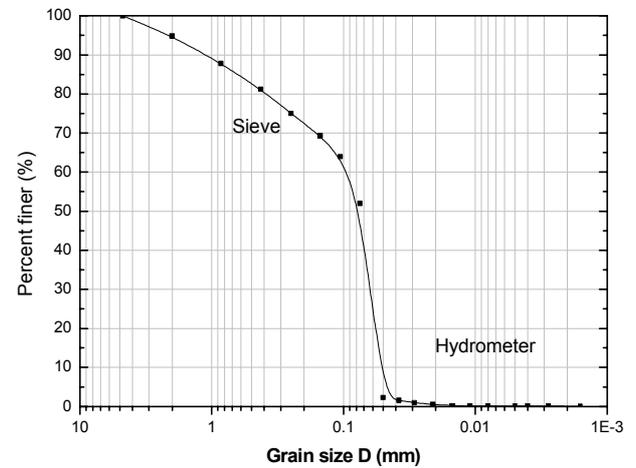


Fig. 5. Grain size distribution for silty soils

Table 1. Engineering properties of silty soils

| Item | Quantity |
|--|-----------------------|
| Specific gravity | 2.67 |
| Uniform coefficient | 2.0 |
| Coefficient of gradation | 0.85 |
| Optimum moisture content (%) | 16.4 |
| Max. dry unit weight (kN/m^3) | 14.9 |
| Coefficient of permeability (cm/s) | 3.61×10^{-4} |
| USCS Classification | SM |

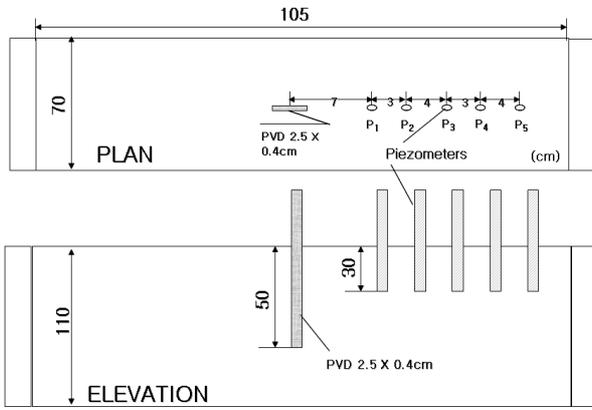


Fig. 6. Schematic of model test box

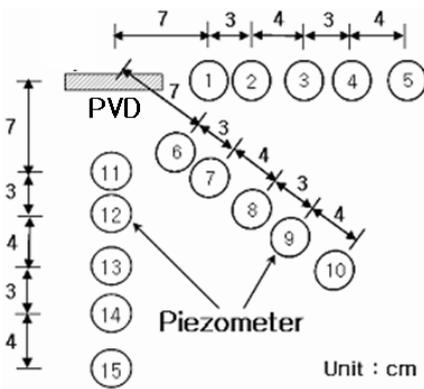


Fig. 7. Plan view of piezometers in model box installation setup

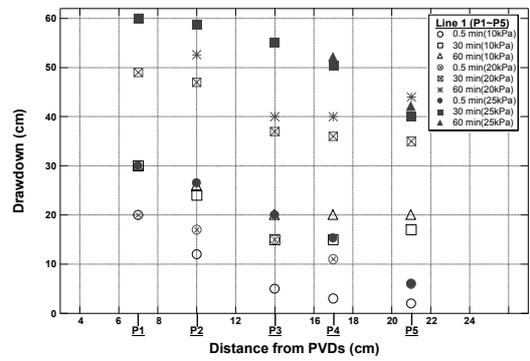
형 토조의 개요도를 나타낸 것으로서 실험 조건에 따른 영향범위와 스미어존을 평가하였다. 연직배수재는 각각 폭이 2.5cm, 5.0cm로 단면을 축소 제작하여 실험을 수행 하였다. 이 때 폭이 2.5cm 일 경우에는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 피에조미터 간격을 결정하여 설치하였고, 폭이 5.0cm 일 경우에는 영향범위를 예측하여 피에조미터 간격을 12cm로 하여 설치하였다.

흙시료의 준비는 토조 내부에 단계별로 포설하고 진동 컴팩터를 이용하여 다짐을 실시하였다. 다짐 실시후에 저수조에서 물을 공급하여 48시간 이상 안정화 시키면서 동시에 시료의 상부에는 흙의 팽창을 방지하기 위하여 일정 하중을 가하여 구속하였다. 모형토조내 흙 시료를 안정화 시킨 후 직경이 3mm인 피에조미터 15개를 3개의 열로 나누어 각각의 위치마다 설치하였다. 흙의 상부표면은 진공 손실을 최소화하기 위하여 불투수성 멤브레인 쉬트로 도포 하였다. 모형토조내에서 배수재를 통한 물의 흐름은 배수재의 코어에 4cm로 삽입된 진공튜브를 통해 추출되었다.

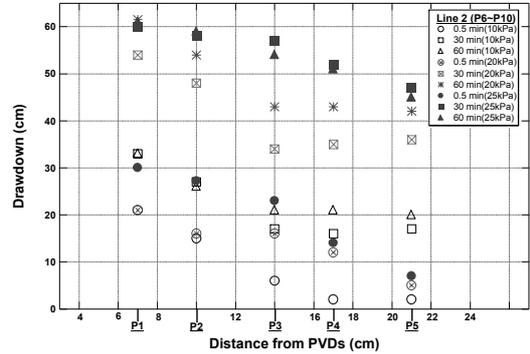
3.2.2 실험결과 및 분석

(1) 영향 범위의 평가

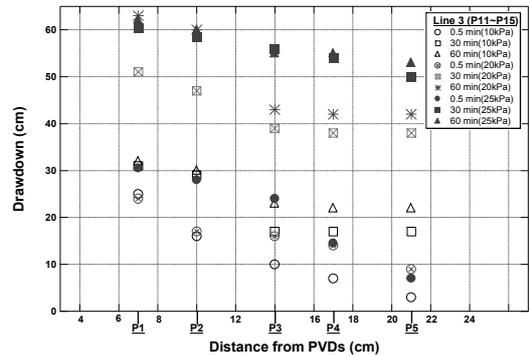
영향범위를 평가하기 위해서 모형토조내 흙시료를 단위



(a) Line 1 (P1~P5)



(b) Line 2 (P6~P10)



(c) Line 3 (P11~P15)

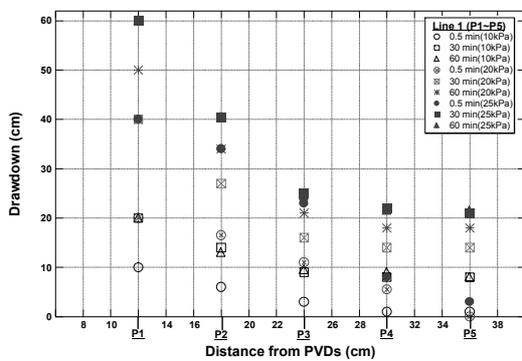
Fig. 8. Variation of average head with piezometer spacing distance (Width : 2.5cm)

중량이 $14.9kN/m^3$ 이 되도록 단계별로 포설하여 다짐을 수행하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 각각 연직배수재 폭이 2.5cm, 5.0cm로 단면을 축소시켰을 경우의 영향범위 측정 결과를 각각 피에조미터의 거리에 따른 수두 데이터의 평균값으로 나타낸 것이다. 연직배수재에 진공압을 가했을 때 배수재로부터의 거리가 멀어짐에 따라 진공압에 대한 영향력이 감소하여 시간에 따른 간극수압의 변화폭은 감소하였다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 폭이 2.5cm인 배수재에서 10kPa의 진공압을 적용하였을 경우 거리에 따른 간극수압의 변화는 대략 14cm에서 16cm까지 급격하게 감소한 후 일정하게 유지되는 경향을 나타내었다.

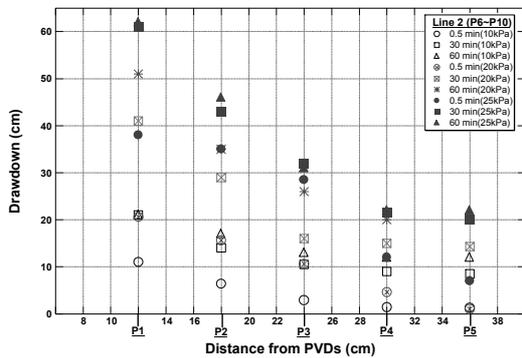
Fig. 9에 도시된 바와 같이 폭 5.0cm인 배수재의 경우

는 26cm에서 30cm 사이에서 압력강하가 일정하게 유지되었고, Fig. 8의 폭이 2.5cm 일 경우보다 더 뚜렷한 영향 범위의 경계를 나타내었다. 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보았을 때, 30분 후의 간극수압과 60분 후의 간극수압의 변화가 차이를 나타내지 않았다. 이는 대략 30분 정도 시간이 경과한 후부터는 간극수압이 평형상태를 이루는 것으로 예측할 수 있어 일정 간극수압이 유지되는 것으로 판단된다. 또한, 20kPa와 25kPa의 더 큰 진공 압력을 작용시켰을 경우에도 10kPa의 진공압력을 작용시켰을 때와 마찬가지로 30분의 시간이 경과 후부터 간극수압의 변화가 거의 일정한 경향을 나타내었다.

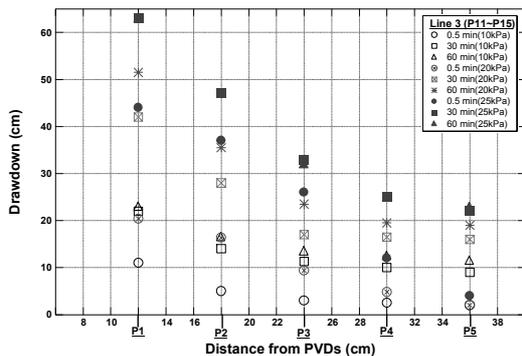
그러나 25kPa로 진공압력을 더 크게 증가시켰을 경우



(a) Line 1 (P1~P5)



(b) Line 2 (P6~P10)



(c) Line 3 (P11~P15)

Fig. 9. Variation of average head with piezometer spacing distance (Width : 5.0cm)

그래프의 곡선은 약간 변화하나, 각 열의 피에조미터에서의 최종 간극수압은 변화하지 않는 것으로 나타나 한계진공압 상태를 알 수 있다. 또한 진공압력을 10kPa에서 20kPa로 증가하였을 경우, 연직배수재의 폭이 2.5cm 일 때는 배수재로부터의 거리가 대략 14cm에서 16cm, 폭이 5.0cm 일 경우에는 영향반경 26cm에서 30cm를 넘어가면 서부터는 간극수압이 더 이상 감소하지 않고 일정해지는 것으로 보아 배수재가 영향을 미칠 수 있는 유효 영향범위로 판단할 수 있다.

(2) 등가직경 산정

본 실험에서 적용된 연직배수재의 종류는 원형이 아닌 사각 형상을 띄고 있기 때문에 이것을 현장 적용을 위한 설계를 하려면 등가의 원형단면으로의 환산되어야 한다. 연직배수재는 원형이 아닌 길고 납작한 장방형 단면이다. 따라서 연직배수재를 압밀을 목적으로 연직배수재를 설계 하기 위해서는 반드시 등가원형직경으로 환산하여 설계하여야 한다. Gabr et al.(1995)은 연직배수공법의 적용에 따른 지반교란의 영향을 고려하기 위하여 배수재의 등가직경을 감소시키거나 지반교란 예상지역의 투수계수를 저감시키는 방안을 제시하였다. 그러나 Hansbo et al.(1981)이 제시한 바와 같이 지반교란영역이나 투수계수의 감소량을 산정하는 것은 매우 어렵기 때문에 배수재의 등가직경을 저감시킴으로써 지반교란 효과를 고려하였다. Table 2는 밴드 형태의 연직배수재를 다양한 등가직경 방정식을 이용하여 나타낸 것이다.

등가직경과 영향반경에 대한 실험적 연구를 수행하기 위하여 사용된 연직배수재의 두께는 0.4cm 이고, 폭은 각각 실크기의 배수재가 10cm, 축소단면 배수재가 각각 2.5cm와

Table 2. Equivalent diameter equations for PVDs

| Reference | Equivalent diameter equations | PVDs Width (cm) | Equivalent diameter (cm) |
|--------------------------------|--|-----------------|--------------------------|
| Hansbo (1981) | $d_e = \frac{2(w+t)}{\pi}$ | 2.5 | 1.85 |
| | | 5.0 | 3.44 |
| | | 10.0 | 6.62 |
| Atkinson and Eldred (1981) | $d_e = \frac{(w+t)}{2}$ | 2.5 | 1.45 |
| | | 5.0 | 2.70 |
| | | 10.0 | 5.20 |
| Fellinius and Catonguay (1985) | $d_e = \left[\frac{4(w \times t)}{\pi} \right]^{0.5}$ | 2.5 | 1.13 |
| | | 5.0 | 1.60 |
| | | 10.0 | 2.26 |
| Long and Covo (1994) | $d_e = (0.5w + 0.7t)$ | 2.5 | 1.53 |
| | | 5.0 | 2.78 |
| | | 10.0 | 5.28 |

5.0cm로서 이를 Hansbo(1981), Atkinson and Eldred(1981), Long and Covo(1994) 등 각각의 제안자별 등가직경방정식을 이용하여 나타내었다. 등가직경을 환산한 결과는 본 연구에서 수행된 모형토조 실험을 통하여 추출을 함으로서 영향범위와 통수능을 결정하였고, 이 결과로 등가환산직경을 산정할 수 있다. Table 2에 나타난 등가직경 결과는 제안된 4개의 등가직경 방정식을 이용하여 본 실험에서 사용된 배수재의 폭이 각각 2.5cm와 10cm 일 때를 계산하여 산정된 값이다.

연직배수재의 축척효과에 의한 축소된 크기는 Theis(1935) 방정식에 기초를 둔 Welker(1998)가 제안한 식 (2)을 이용하여 연직배수재의 폭과 간격을 결정하였다. 여기서, r_e 는 펌핑시 영향반경이고, r_w 는 추출정의 반경이다.

$$\left[\frac{r_e}{r_w} \right]_{Field} = \left[\frac{r_e}{r_w} \right]_{Laboratory} \quad (2)$$

데이터 계측결과에 의해 추정된 영향반경 결과와 등가직경 제안식에 의하여 계산된 배수재의 등가직경을 상기 식 (2)를 이용하여 각각의 영향반경을 재계산한 값들과 비교 분석하였다. Atkinson and Eldred(1981)가 제안한 등가직경은 연직배수재 폭이 10cm, 두께가 0.4cm에 대하여 5.2cm의 값을 나타내었다. 즉, 본 연직배수재의 크기를 상기 식에 대입하여 계산하면, 폭 2.5cm인 연직배수재일 경우 진공시 영향범위는 12.5cm가 도출되었고, 실내모형 토조실험을 통하여 도출된 유효 영향범위는 14cm에서 16cm로 나타나 거의 비슷한 범위로 도출되었다. 또한, 폭이 5.0cm인 배수재일 경우에도 진공시 영향범위는 26cm에서 30cm 정도로서 Welker(1998)의 제안식으로 계산된 값인 25.5cm와 거의 유사한 범위를 나타내었다.

(3) 스미어 효과

흙의 스미어효과는 배수재를 설치하고 시료를 포화시켰을 경우와 배수재를 밀어넣었을 경우에 따라 설치방법을 달리하여 통수능을 비교함으로써 평가하였다. 배수재를 밀어 넣어 타입하였을 경우 25kPa의 진공압에서 통수능은 $2.39\text{cm}^3/\text{s}$ 로 나타났고, 같은 진공압 상태에서 배수재를 미리 설치한 경우에는 통수능은 $3.13\text{cm}^3/\text{s}$ 로 나타났다. 상기 실험결과를 분석하여, 같은 조건에서의 흙시료는 배수재 타입방법에 따라 영향범위와 통수능을 비교하여 흙의 교란 영향을 평가하였다. 즉, 연직배수재를 미리 설치하여 흙의 교란을 최소화 하였을 경우가 연직배수재를 밀어 넣어 설치하였을 경우보다 영향범위와 통수능이 크게 나타났다.

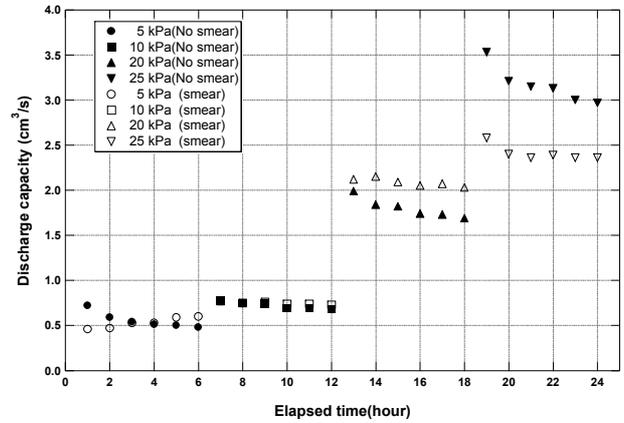


Fig. 10. Extracted flowrate from PVD with elapsed time

Fig. 10에 나타난 바와 같이 연직배수재 타입형식에 대하여 통수능은 진공압력이 각각 5, 10, 20kPa 일 때 일정한 정류상태를 유지하는 좋은 결과를 나타내었다. 그러나 진공압력이 25kPa일 경우, 처음에는 일정한 정상상태의 흐름을 유지하면서 나타났지만, 이후 시간이 지나면서 점차적으로 감소하여 최종적으로 통수능은 각각 $2.97, 2.36\text{cm}^3/\text{s}$ 을 나타내었다. 통수능 결과에서의 이러한 변화는 흙이 필터층을 생성하면서 세립분의 이동과 배수재의 막힘현상(clogging)에 의한 것으로 판단할 수 있다.

4. 토양증기추출 복원시스템 적용시 지반공학적 특성

본 논문에서는 토양증기추출 복원시스템을 적용하여 진공추출시 공기흐름률과 투기계수와와의 관계를 규명하였고, 대상시료에 대하여 각각 다른 함수비 및 다짐 상태를 조성하여 진공압력을 적용한 후, 그에 따른 연직배수재의 추출률 및 효과를 나타내었다. 투기계수, 입자크기, 함수비, 지반의 다짐도 등은 현장에서 토양증기추출공법을 적용시 가장 큰 영향을 주는 인자로서 이에 대한 결과를 바탕으로 연직배수시스템의 기본적인 연구자료로 활용할 수 있다.

투기계수(gas permeability, k_g)는 토양증기추출 복원시스템을 적용함에 있어 매우 중요한 인자로서 지반이나 암석 등과 같은 매질이 얼마나 기체를 잘 통과시키는지에 대한 기준이 되며, 유체와 매질의 특성을 함께 나타내는 수리전도도와는 구분된다(US EPA, 1997). 본 논문에서는 흙의 투기계수를 측정하고자 모형토조를 이용하여 설치 지반의 다짐도 및 함수비 상태에 따라 각각 공기추출률과 진공압을 도출하여 나타내었다.

4.1 실험방법

우선 정확한 투기계수를 결정하기 위하여 불포화 지반에서 영향범위를 산정하였다. 즉, 앞서 제시한 Theis 방정식에 의해 단면을 축소시킨 폭이 2.5cm 인 연직배수재를 제작하여 실내모형실험에 기하학적인 적합성을 유도하여 실험실 규모의 모형토조실험을 통한 연직배수재의 등가직경과 영향범위를 산정하였고, 공기흐름률에 따른 투기계수를 측정하였다. 모형 토조는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 길이 120cm, 폭 70cm, 깊이 110cm 이며, 전면판은 투명 아크릴 판넬로 제작하여 지하수위와 흡시료의 상태를 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 토조의 양측면은 지하수위를 조절을 위한 저수조를 두었으며, 저수조와 토조 사이는 흙의 중량과 다짐으로 인한 토조의 과도한 변형을 억제하기 위하여 모형토조 외부에 강재로 제작된 브레이싱 시스템을 설치하였다. 측압에 견딜 수 있도록 브레이싱을 보강 후에 0.074mm 와이어 매쉬 및 지오텍스타일 섬유로 처리를 하여 대기압력이 유지됨과 동시에 흙 시료의 유출을 방지하였다.

Fig. 12에 나타난 바와 같이 모형토조내 설치된 간극수



Fig. 11. Laboratory model test box



Fig. 12. PVDs and piezometer setup for model test box

압계와 연직배수재를 통한 진공압을 적용시에 공기압력을 측정하면서 폭이 2.5cm 인 축소된 연직배수재를 타입한 후, 영향범위를 측정할 수 있도록 각각의 계산된 거리에 따라 6개의 피에조미터를 설치하였다. 연직배수재 상부에서의 진공흐름률은 1,111~3,333cm³/s로 변화시켰고, 각각 수두와 거리에 따른 진공압력의 변화는 간극수압계와 데이터 수집장치를 통하여 기록하였다. 연직배수재와 진공 튜브는 진공손실과 공기침투를 최소화하기 위하여 덕트 테이프로 봉인을 하고 압력계와 연결하기 위하여 연직배수재 상부 5cm 정도를 직경이 19mm인 플라스틱 튜브를 이용하여 공기와 물의 흐름이 원활히 유지될 수 있도록 하였다.

4.2 결과 및 분석

토양증기추출기술에서 투기계수는 가장 중요한 영향인자로서 투기계수의 정확한 값은 현장시험 또는 실내실험을 통하여 얻을 수 있다. 실내모형실험을 통하여 데이터를 수집하고, 이를 방사형 흐름에 관한 이론을 이용하여 도출된 다음 식 (3)으로 투기계수를 결정하였다(Johnson et al., 1990). 모형토조에 설치된 연직배수재를 통한 공기흐름률과 수두손실을 측정하여 흡시료에 대한 투기계수를 계산하였다.

$$k_g = \frac{Q \ln\left(\frac{r_w}{R_i}\right) \mu}{\pi H P_w [1 - (P_{atm}/P_w)^2]} \quad (3)$$

여기서, k_g = 공기흐름상태에서의 투기계수(cm² or Darcy), μ = 공기의 점도 = 1.8×10^{-4} gf/cm-s, P_w = 추출정에서의 절대압력(atm), P_{atm} = 절대 대기압 = 1 atm, r_w = 공기추출정의 반경(cm), R_i = 공기추출정에서의 영향반경(cm), H = 추출정에서의 스크린 간격(cm), Q = 추출배수재에서의 유입되는 공기 유량(cm³/s)이다.

Fig. 8과 Fig. 9의 영향범위 결과에 나타난 바와 같이 포화영역과 불포화영역의 영향범위는 비슷한 결과로 예측된 바, 연직배수재 주변에 가장 가깝게 위치하며 같은 거리에 위치에 있는 피에조미터 P1에서 공통적으로 간극수압 감소와 수두손실이 비슷한 경향을 나타내었다. 또한, 토양증기추출정에서의 연직배수재 적용은 원형웰과 같이 방사형 흐름 형태 이론을 기초로 하였다. Fig. 13은 연직배수재에서 측정된 각각의 다른 공기흐름률 상태에서의 일정거리에 위치한 피에조미터의 수두를 나타낸 것으로서 피에조미터 P1과 P2 사이에서 더 큰 수두손실을 나타내었다. 수두손실이 증가함에 따라 흐름률도 증가하였고, 피에조미터

P2와 P3 사이에서의 수두는 피에조미터 P1과 P2 사이에서의 수두손실에 약 22%의 차이를 나타내고 있다.

따라서, Fig. 14에 나타난 바와 같이 타입된 연직배수재로부터의 거리가 14cm 범위 내에서 가장 큰 수두손실이 발생된 것을 알 수 있다. 이런 거동을 나타내는 이유는 토조안 포설된 흙의 깊이에 따른 함수비가 일정하지 않기 때문이고, 추출 연직배수재로부터 영향반경이 멀어질수록 함수비는 감소하는 것을 나타내고 있다. 이 이유는 함수비의 흐름이 추출 연직배수재로 이동되기 때문에 추출배수재에 가장 가까운 곳에서 수두손실이 가장 크게 발생한 것으로 사료된다.

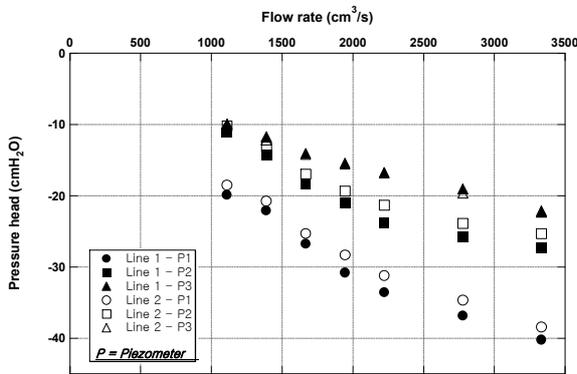


Fig. 13. Pressure head vs. flow rate

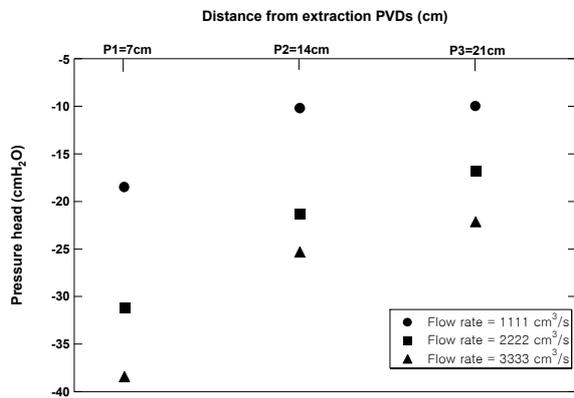


Fig. 14. Pressure head as distance from extraction PVDs

투기계수는 Table 3에 나타난 바와 같이 서로 다른 4개의 등가직경 방정식으로 평가할 수 있다. Fig. 15는 다양한 흐름률 상태에서의 4개의 제안식으로 가정된 투기계수를 나타낸 것으로서 등가직경이 증가 할수록 계산된 투기계수의 값은 감소함을 나타내었으며, 특히 4가지 제안된 등가직경 중 보편적으로 사용되고 있는 Atkinson and Eldred(1981) 방정식을 보았을 때, 공기흐름률에 대한 투기계수의 범위는 대략 2.8에서 3.3 Darcy를 나타내었다. 이 값은 주어진 함수비와 단위중량 조건을 고려할 때, Johnson(1990)이 제안한 세립질모래의 범위인 1~10 Darcy에 분포하여 실험의 유효성을 입증하고 있다.

Table 3에 제시된 바와 같이 낮은 흐름률 상태에서는 피에조미터에서 낮은 수두손실을 나타내어 흐름률이 1,500 cm^3/s 보다 작을 때에는 정밀도가 떨어지고, 흐름률이 높을수록 압력수두는 더 정밀한 값을 나타내어 평균 투기계수 값인 3.152 Darcy에 가까운 공기흐름률은 1,500~2,000 cm^3/s 일 때 가장 정확한 값을 나타내었다. 투기계수는 비록 각각의 시료마다 다소 차이는 있지만, 일반적으로 일정 단위중량 상태에서 투기계수는 함수비가 증가 할수록 공기흐름률 감소와 간극수막의 증가로 다소 감소한다는 것을 예측할 수 있다. 그러나 영향범위 측정시 예측된 결과와 깊이에 따른 공기흐

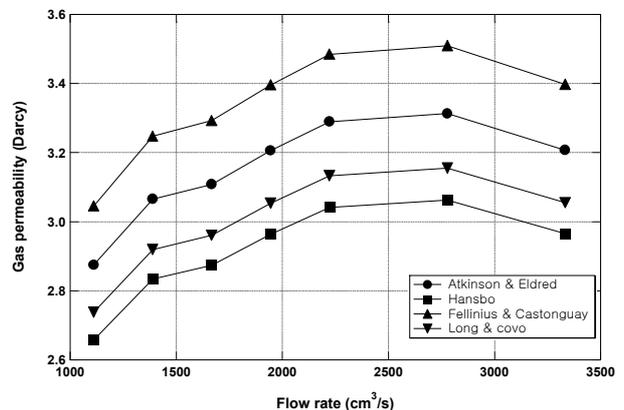


Fig. 15. Gas permeability values for different flow rates

Table 3. Gas permeability values for different equivalent well radius

| Flow Rate (cm^3/s) | P_w (atm) | k_g [Darcy] | | | |
|---------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------|--|-----------------------------|
| | | Atkinson-Eldred $R_w=1.38cm$ | Hansbo $R_w=1.78cm$ | Fellinius & Castonguay $R_w=1.13cm$ | Long & Covo $R_w=1.62cm$ |
| 3,333 | 0.7232 | 3.2074 | 2.9649 | 3.3978 | 3.0546 |
| 2,778 | 0.7687 | 3.3129 | 3.0624 | 3.5095 | 3.1551 |
| 2,222 | 0.8083 | 3.2896 | 3.0409 | 3.4849 | 3.1330 |
| 1,945 | 0.8258 | 3.2058 | 2.9634 | 3.3961 | 3.0531 |
| 1,667 | 0.8442 | 3.1083 | 2.8733 | 3.2928 | 2.9602 |
| 1,389 | 0.8665 | 3.0653 | 2.8336 | 3.2473 | 2.9193 |
| 1,111 | 0.8848 | 2.8745 | 2.6572 | 3.0452 | 2.7376 |

름률과 압력수두 결과를 살펴보면, 모형토조내에 다짐 과정 동안 함수비 증가에 따라 흙이 더 큰 덩어리가 되어 간극크기는 증가하게 되고, 가장 큰 간극을 통한 흐름이 우세해지기 때문에 함수비가 증가될수록 간극이 크기가 더 커져 투기계수가 크게 나타날 수도 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 연직배수시스템의 적용성을 위하여 오염토양 복원시 지반에 영향을 주는 인자에 대한 지반공학적 특성 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 토양세정복원시스템 적용시 진공압력이 커질수록 폭과 길이에 따른 마찰계수값이 커지고, 마찰계수에 따라 수두손실이 증가하여 연직배수재의 배수저항이 커지므로 전수성은 주어진 압력까지 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 진공압력을 10kPa에서 20kPa로 증가하였을 경우, 연직배수재의 폭이 2.5cm 일 때는 배수재로부터의 거리가 대략 14cm에서 16cm, 폭이 5.0cm 일 경우에는 영향반경 26cm에서 30cm를 넘어가면서부터 간극수압이 더 이상 감소하지 않고 일정해지는 것으로 보아 배수재가 영향을 미칠 수 있는 유효 영향범위로 판단하였다.
- (2) Atkinson and Eldred(1981)가 제안한 등가직경은 연직배수재 폭이 10cm, 두께가 0.4cm에 대하여 5.2cm의 값을 나타내어 영향범위 계산시 폭 2.5cm인 연직배수재일 경우 12.5cm로 나타나 모형실험 결과로 도출된 유효 영향범위인 14cm에서 16cm와 거의 비슷한 범위로 도출되었다. 또한, 폭이 5.0cm인 배수재일 경우에도 진공시 영향범위는 26cm에서 30cm 정도로서 Welker(1998)가 제안한 식으로 계산된 값인 25.5cm와 거의 유사한 범위를 나타내었다.
- (3) 각각의 공기흐름률 상태에서 일정거리에 위치한 피에조미터의 수두를 측정된 결과, 수두손실이 증가함에 따라 흐름률도 증가하였으며, 물의 흐름이 추출 연직배수재로 이동되기 때문에 추출배수재에 가장 가까운 간극수압계에서 수두손실이 가장 크게 발생하였다.
- (4) 등가직경이 증가 할수록 계산된 투기계수의 값은 감소함을 나타내었으며, 공기흐름률에 대한 투기계수의 범위는 대략 2.8에서 3.3 Darcy를 나타내었다. 일정 단위중량 상태에서 투기계수는 함수비가 증가 할수록 공기흐름률 감소와 간극수막의 증가로 다소 감소한다는 것을 예측할 수 있다.

상기 도출된 등가직경, 영향범위, 공기흐름률, 투기계수 등의 지반공학적 특성을 바탕으로 오염토양 복원을 위한 연직배수시스템의 실제 기초설계에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

1. 고석오(2002), 토양 및 지하수 복원기술 동향 및 현장적용, 2002 *지반환경*, 한국건설기술연구원, pp. 129~156.
2. 신은철, 박정준, 김종인(2005), 연직배수재를 이용한 폐석회 슬러지의 지반개량 효과, *한국지반환경공학회 논문집*, 제 6권, 제 2호, pp. 51~60.
3. 신은철, 박정준, 노정민(2005), 연직배수재를 이용한 오염토양복원 특성 평가, 2005 *한국지반공학회 분학술발표회 논문집*, pp. 1400~1407.
4. 정하익(2003), 연직배수공법을 이용한 오염지하수의 복원, 2003 *지반환경*, 한국건설기술연구원, pp. 183~201.
5. Atkinson, M. S. and Eldred, P. J. L.(1981), Consolidation of Soil Using Vertical Drains, *Geotechnique*, Vol. 31, No. 1, pp. 33~43.
6. Bowders, J. J. and Gabr, M. A.(1995), Strip-drains for in Silty Clean up of Contaminated Fine-grained Soils, *Geotechnical News*, Vol. 13, No. 3, pp. 21~25.
7. Collazos, O. M., Bowders, J. J. and Bouazza, M.(2002), Enhanced Soil Vapor Extraction Using PV Drains, *4th ICEG Environmental Geotechnics*, Sweta & Zeitlinger, Brazil, pp. 761~766.
8. Gabr, M. A., Bowders, J. J. and Wokasien, S.(1995), Prefabricated Vertical Drains for Enhanced Soil Flushing, *Geoenvironment 2000 Conference Proceedings*, ASCE Special Pub. No. 46, New Orleans, pp. 1250~1264.
9. Gabr M. A., Bowders J. J., Wang. J. and Quaranta J. D. (1996), In Situ Soil Flushing Using Prefabricated Vertical Drains, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 1, pp. 97~105.
10. Gabr, M. A., Williamson, A., Sabodish, M. and Bowders, J. J.(1999), BTEX Extraction from Clay Soil Using Prefabricated Vertical Drains, *ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 615~618.
11. Hansbo, S., Jamiolkowski, M. and Kok, L.(1981), Consolidation by Vertical Drains, *Geotechnique*, Vol. 31, No. 1, pp. 45~66.
12. Johnson, P. C., Stanley, C. C., Kemblowsky, D. L., Byers, D. L. and Colthart, J. D.(1990), A Practical Approach to the Design, Operating, and Monitoring of In-situ Soil Venting Systems, *Ground Water Monitoring Review*, 10, pp. 159~178.
13. Long, R. and Covo, A. (1994), Equivalent Diameter of Vertical Drains with an Oblong Cross Section, *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 120, No. 9, pp. 1625~1630.
14. Quaranta, J. D., Gabr, M. A., Cook and Szabo, D.(1997), Developments in Prefabricated Vertical Drain Enhanced Soil Flushing, *Proceedings, Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 703~706.
15. Theis, C. V.(1935), The Relation between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage, *Transactions of the American Geophysical Union* 2, pp. 519~524.
16. US EPA(1997), *Remediation Case Studies: Soil Vapor Extraction and Other In situ Technologies*, EPA/542/R-97/009.
17. Welker, A. L., Logan, M. and Knight, S. B.(1998), Design Issues of a Prefabricated Drain Remediation System, *Geotechnical News*, Vol. 16, No. 1, pp. 31~35.

(접수일: 2007. 3. 26 심사일: 2007. 4. 20 심사완료일: 2007. 9. 17)