

꺾임이 발생한 연직배수재의 내부 막힘현상

Effect of the Internal Clogging on the Kink Zone of PBD

김래현¹⁾, Raehyun Kim, 홍성진¹⁾, Sung-Jin Hong, 김재정²⁾, Jaejeong Kim, 최영민²⁾, Yongmin Choi, 이우진³⁾, Woojin Lee

- ¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
²⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
³⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

SYNOPSIS : Several well resistance effects induced by bending, confining stress, temperature, bubbles, and apparent opening size have been considered and researched for the reasonable PBD design. The effect of apparent opening size(AOS), however, was not extensively studied and the clogging effect by AOS was not clearly researched. In this paper, the slurry consolidation test which 4 types of PBD are installed in large slurry consolidometer(H×D, 2.0m×1.2m) is performed to investigate the clogging effect by filter's AOS. The results show that the internal clogging is observed all types of PBD, and a quantity of inflowed soil particles are increased at the lower part of PBD and the kink zone. In addition, the internal clogging phenomenon does not relate with the shape and size of PBD. In filter's AOS test, it was easily observed that soil particles bigger than AOS of tested filter passed PBD filter by SEM. This paper demonstrates that the reduction of discharge capability may be accelerated by internal clogging at the kink zone.

Keywords : 막힘현상, 유효구멍크기, 막힘현상, 연직배수재, 배수저항

1. 서론

국내외에서 널리 사용되고 있는 PBD 공법은 간극수를 단기간에 신속히 배출시키기 위한 방법이며 많은 연구자들에 의해 방사방향 압밀이론으로 그 메커니즘이 설명되고 있다.(Barron 1948; Yoshikuni 1979; Hansbo 1981; Onoue 1988) 배수재의 배수능력에 영향을 미치는 요인은 지중의 구속압, 압밀에 따른 좌굴현상, 배수재 내부의 기포량 또는 동수경사 등 다양한 것으로 알려져 있다. 그 중 배수필터의 AOS(Apparent Opening Size, 유효구멍크기)에 의한 연직배수재의 배수성능 저하 현상은 이론적, 실험적으로 규명이 난해하고 현상에 대한 정성적 예측만 하고 있을 뿐 관련 연구가 미비하여 현상 규명조차 명확히 이루어지지 못하고 있다. 본 연구에서는 배수재 필터의 유효구멍크기에 따른 배수재의 막힘현상(clogging) 정도를 실내 시험을 통해 확인하고자 한다. 균질한 대형 점토시료의 조성이 가능한 슬러리 압밀시험기를 이용하여 PBD에 의해 방사방향 압밀이 종료된 이후 배수재를 해체하여 실제로 발생한 내부 막힘현상을 관찰하였다. 또한 필터재 입자투과시험을 통해 필터의 AOS 크기에 따라 유입된 입자의 크기를 SEM 영상분석을 통해 분석하였다.

2. 연직배수재의 통수능 저하

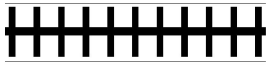

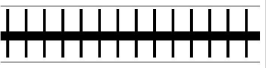

PBD가 타설된 지반은 압밀이 진행되면서 배수재의 변형 및 굴곡, 내구성에 따른 재료성능 감소 등 여러 복합적인 요소로 인해 압밀지연 현상이 나타나며 이러한 통수능력 감소현상을 통칭하여 배수저항(well resistance)이라 표현한다. 배수재의 배수성능에 영향을 미치는 요인으로는 크게 외적 요인과 내적 요인이 있다. Lawrence와 Koerner(1988)은 압축성이 큰 연약층일 경우 대변형으로 인한 국부적인 꺾임이나 접힘현상이 발생하게 되어 통수능을 저하시키게 되며, 20%의 좌굴이 생길 경우 구속압 별로 20% 정도의 통수능 저하를 보인다고 하였다. 또한 강민수 등(1988)은 지반내 타설된 배수재 주위의 측방토압에 의해 배수재의 유로 단면적이 감소되며 50kPa~100kPa 범위의 구속압에서 통수능 저하가 크게 발생된다고 하였다. 특히 PBD 필터재의 유효구멍크기를 나타내는 AOS는 알고 있는 입경의 유리구슬을 입경이 작은 것으로부터 50g씩 배수재 위에 올려놓고 체 진동기를 이용하여 50Hz의 속도로 10분간 진동시켜 통과량 5%에 해당하는 입경을 O_{95} 로 표기한 것으로 필터재 내외부에서 막힘현상을 유발한다. 필터재의 AOS와 주변지반을 구성하는 입경에 따라 클로킹(Clogging), 블록킹(Blocking) 현상이 발생되며, 인접 지반 내에서는 블라인딩(Blinding), 파이프(Piping) 등의 다양하고 복잡한 현상이 나타나며 이러한 AOS와 관련된 현상들은 PBD의 거동 및 배수성능에 직접적으로 영향을 주고 있다.

3. 시험조건 및 장치

본 연구에서는 폴리프로필렌(PP) 재질로 제작된 코어를 사용하는 PBD 중 코어의 형상과 채널수, 단면의 크기 및 필터의 유효구멍크기에 따라 4종류의 PBD를 적용하였으며 그 제원은 표 1과 같다. 그림 1과 같은 대형 압밀시험 장치에 4개의 PBD를 90°방향으로 각각 설치하고 시간에 따라 각 PBD의 배수량을 측정하였다. 시료의 압밀침하량은 LVDT를 설치하여 측정하였으며 시간-침하량 곡선을 도시하여 압밀 진행 정도를 평가하였다. 알루미늄 재질의 직경 1.2m, 높이 1.0m의 원통형 튜브 2개가 상하로 연결된 높이 2.0m의 대형 압밀시험 장치는 유압식 피스톤을 이용하여 압력을 재하하며 장기계측을 위해 압력보정이 가능한 장치가 별도로 설치되어 있어 항상 일정한 하중이 전달되도록 하였다. 또한 가압용 유압식 피스톤 로드를 통해 전달된 하중의 편심을 방지하기 위해 로드와 유압장치 사이에 교차장치를 설치하여 편심에 의한 시료의 불균형 응력분포 발생을 방지하였다.

필터재 입자투과시험은 그림 2와 같이 직경 150mm, 높이 370mm의 상부 원통형 셀에 하부 셀을 결합한 장치에 점토입자를 침강시켜 필터재와 지반사이에서 발생하는 초기 배수 메커니즘이 모사되도록 하였다. 충분히 교반된 슬러리 상태의 점토시료가 자중 압밀($i=1$)되는 동안 미립자가 물과 함께 필터재를 통과하는 현상을 관찰하고, 주사전자현미경(SEM)촬영으로 필터재를 통과한 입자의 크기를 실측하였다. 본 시험에서는 유효구멍크기가 다른 3종류의 필터재에 대해 7일 동안 자중압밀을 실시하였으며, 사용된 필터재의 AOS는 $75\mu\text{m}$ (Filter-A), $120\mu\text{m}$ (Filter-B) $225\mu\text{m}$ (Filter-C)이다.

표 1. 실내시험에 사용된 PBD 제원

구 분	PBD- A	PBD- B	PBD- C	PBD- D
시료내 설치위치	180°	270°	0°	90°
코어 형태	하모니카 형	하모니카 형	하모니카 형	요철 형
코어 형상				
폭×두께(mm)	100×4.0	100×4.0	100×3.5	100×3.0
AOS (O_{95})	$75\mu\text{m}$	$120\mu\text{m}$	$75\mu\text{m}$	$75\mu\text{m}$

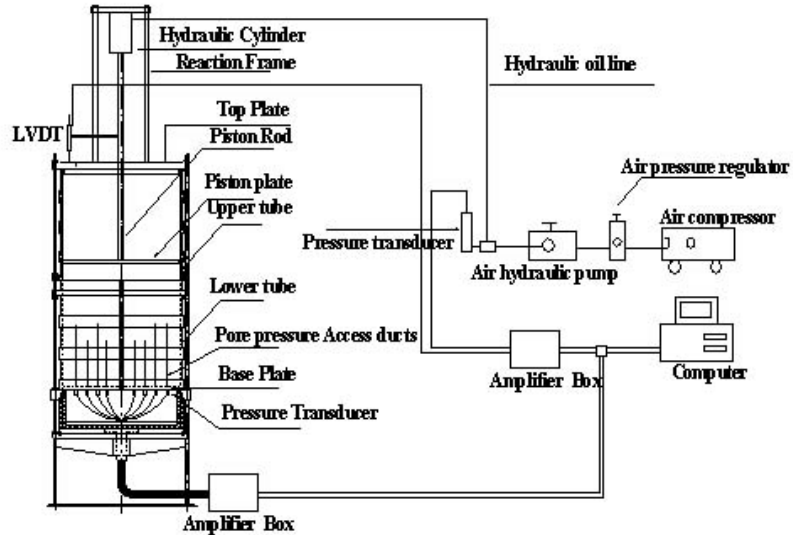


그림 1. 대형 Slurry Consolidometer 구성

4. 시험방법

대형 압밀시험에 사용된 시료는 부산 가덕도 일대에서 채취한 해성점토로서 그림 3과 같은 입도 분포를 보이고 평균 함수비 61.7%, 평균 액성한계 53.4%를 가진다. 시료믹싱기를 이용하여 액성한계의 2배인 120%의 함수비를 가지는 균질한 슬러리 상태의 시료를 조성하였다. 대형 셀 내부에 설치한 하부고정장치를 이용하여 4개의 PBD를 바닥판(Base Plate)에 그림 4와 같이 설치하고 점토 슬러리를 채우기 전에 하부튜브 및 상부튜브를 순서대로 조립한 후 특수 제작된 대형 멤브레인을 씌운다. 충분히 교반된 슬러리를 시료 내부에 공기가 갇히지 않도록 유의하면서 바닥부터 천천히 붓는다. 슬러리 상태의 시료가 원하는 높이까지 채워지면 각각의 배수재에 독립식 배수라인을 연결하여 PBD를 통해서만 간극수가 배출되도록 한다. 재하판에 설치된 유압장치를 이용하여 0.4kg/cm²에서 2.0kg/cm²까지 단계하중을 재하하고, 최종 하중단계에서 방치시킨다. 이후 전체 시료 높이의 40% 압밀이 진행될때까지 일정 시간별로 배수량의 변화와 압밀 침하량을 측정한다. 필터재 입자투과시험은 PBD의 필터만을 시험기 상하부 셀 사이에 고정 시키고 고함수비(150%)로 교반한 시료를 상부 셀에 투입한다. 미소입자가 필터재를 통과되는 현상을 관찰하고 통과된 미립자들은 SEM 분석하여 필터의 AOS별 통과입자 크기를 분석한다.

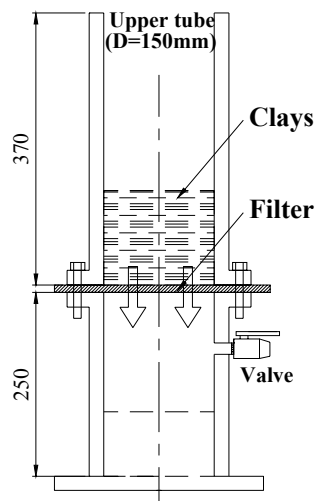
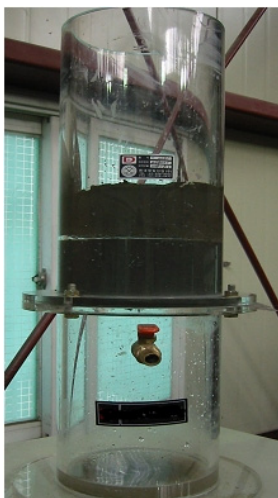


그림 2. 필터재 입자투과시험기

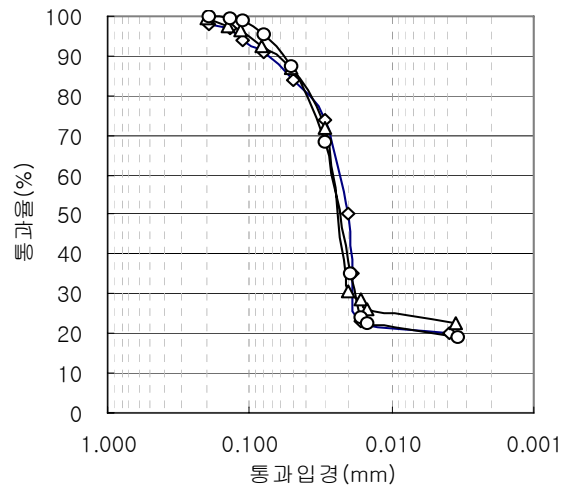
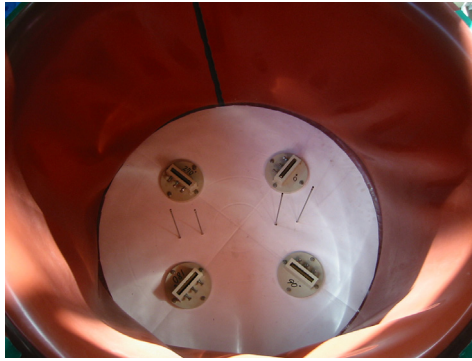
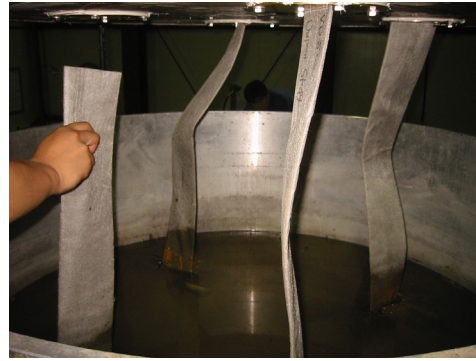


그림 3. 입도분포곡선



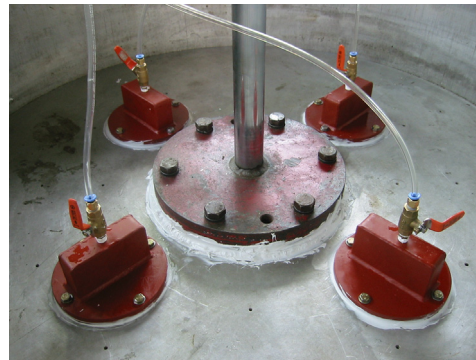
(a)배수재 고정장치



(b)슬러시 시료조성



(c)재하관의 설치



(d)배수라인 연결

그림 4. 대형 슬러리 압밀시험기 시험과정

5. 시험결과 분석

5.1 시간에 따른 배수량 변화

그림 5는 약 40일간 2.0kg/cm^2 의 연직응력으로 압밀되는 동안 각 PBD별로 배출된 간극수량의 변화를 보여주고 있다. 배수초기 단위시간당 각 PBD에서 발생하는 배수량은 유사하나 시간이 지남에 따라 배수재 특성에 의해 다소 차이를 보인다. 그림 6은 시간에 따른 배수재별 누적배수량을 도시한 그래프로 상대적으로 배수재의 두께가 두꺼운 PBD-A와 PBD-B가 나머지 두 PBD에 비해 누적 배수량이 큰 것으로 나타났다. 또한 PBD-D는 배수량이 가장 작은 것으로 나타났으나 이는 요철형 코어가 하모니카형 코어에 비해 통수단면적 측면에서 불리하며 단면두께가 얇기 때문이다. 이러한 결과는 점토지반에 타설된 하모니카형 코어를 가진 배수재와 요철형 코어를 가진 배수재를 비교한 신은철 등(2005)의 연구결과와 일치한다. 동일한 시료 내에 설치된 4개의 PBD는 배수초기에 배수량이 큰 비율로 감소하다가 시간이 경과함에 따라 감소율이 점차 둔화되는 양상을 보이고 있다. 초기 36시간 동안의 발생 침하량은 7.1cm이며 이는 전체 시료 높이 180cm의 3.9%에 해당되는 변형율로써 PBD의 좌굴(bending)이 발생된 시점은 아니므로 좌굴에 의한 배수량 감소로 판단하기는 어렵다.

5.2 내적 막힘현상 관찰

40일간 압밀이 진행된 슬러리 상태의 시료는 47cm가량 침하하여 전체 시료길이의 25%에 해당하는 압축 변형이 발생되었다. 대형 압밀시험 장치를 해체하여 설치된 PBD의 변형정도를 파악한 결과, 일부 구간에서 좌굴(bending)과 꺾임(kinking)현상이 관찰되었다. PBD가 손상되지 않도록 외부 필터를 제거하고 PBD 내부 코어를 관찰한 결과, PBD 상부와 중간부 보다는 하부에서 상당량의 침전물이 육안으로

확인되었으며, 상부로 갈수록 침전된 입자의 양은 적었다.

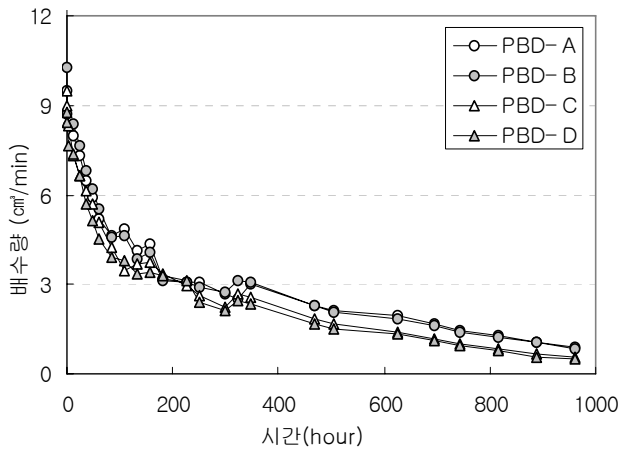


그림 5. 단위시간당 배수재별 배수량

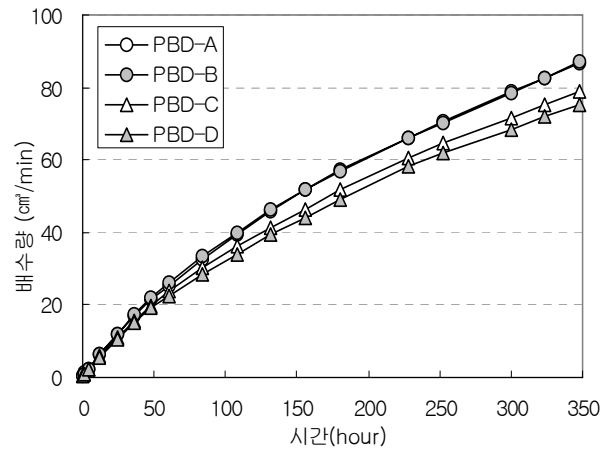


그림 6. 시간에 따른 배수재별 누적배수량

김래현 등(2005)은 일반적으로 필터재를 통과한 입자는 배수재 내부로 유입된 간극수와 함께 외부로 배출되나 입자의 크기가 클 경우 간극수와 함께 배출되지 못하고 PBD 내부에 침전되어 필터재 표면에서 발생하는 외적막힘현상(external clogging)과는 별도로 코어의 배수로에 침전되어 배수능력을 저하시키는 내부막힘현상(internal clogging)을 유발시킨다고 하였다. 본 실험에서는 배수재 하부에 침전되는 현상 외에 그림 7에서 보는 바와 같이 꺾임 현상이 발생된 부위에서 집중적으로 유입된 흙입자가 침전되어 배수재의 유로를 차단하는 현상을 보였다. 즉, 필터재를 통과한 입자들이 간극수와 함께 외부로 배출되지 못하고 일부가 배수재 코어에 침전되어 유로를 차단하는 내적 막힘현상(internal clogging)이 발생하였음을 확인할 수 있었다.

필터재의 AOS 크기가 같으나 배수재의 코어형상이 다른 PBD-A(그림 7)와 PBD-D(그림 8)를 비교한 결과, 코어의 형상에 따른 내부 막힘현상의 차이는 크게 나타나지 않았으며 다만 배수재의 종류와 상관없이 하부로 갈수록 침전된 토립자가 많은 경향을 보였다.

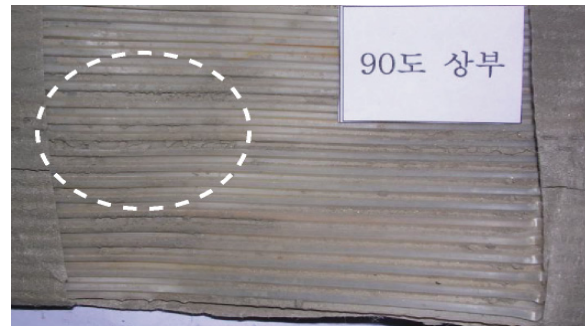


그림 7. 내부막힘현상(PBD-A)

그림 8. 내부막힘현상(PBD-D)

표 2. PBD 내부로 유입된 입자의 크기(SEM, 300배율)

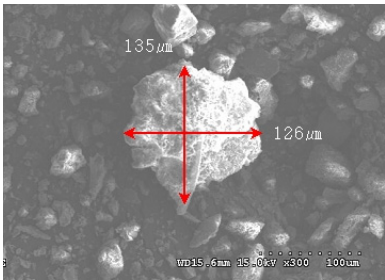
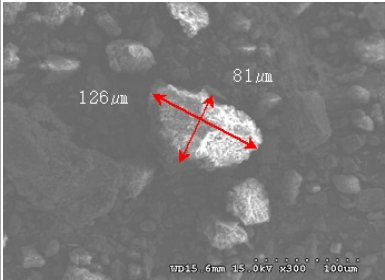
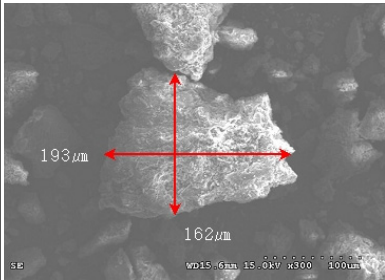
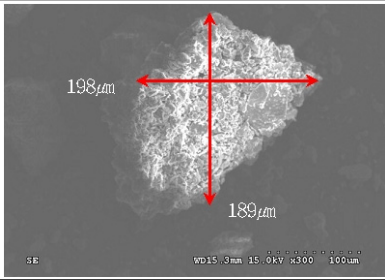
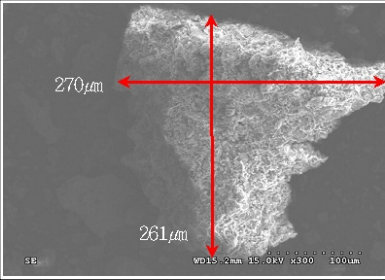
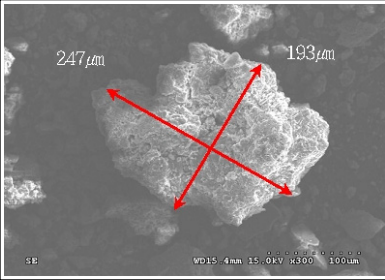
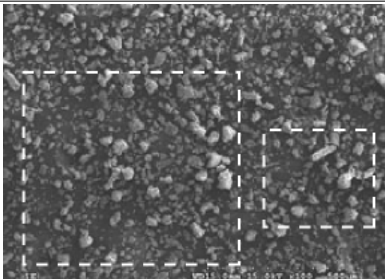
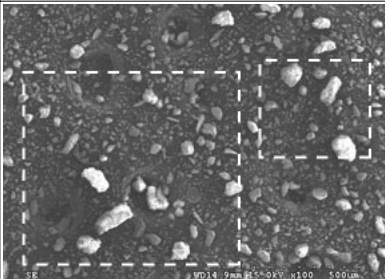
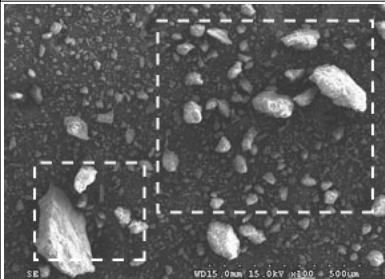
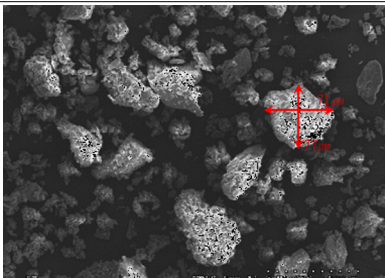
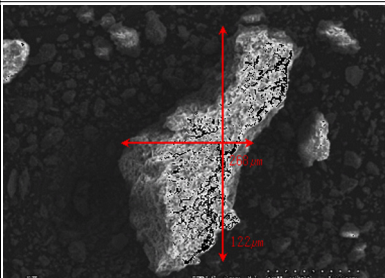
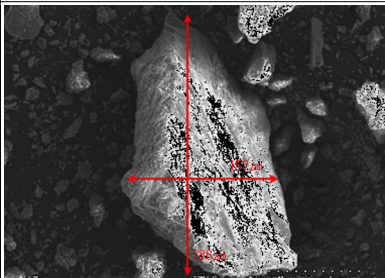
구 분	PBD-A (하모니카형)	PBD-B (하모니카형)	PBD-D (요철형)
AOS	75 μ m(O ₉₅)	120 μ m(O ₉₅)	75 μ m(O ₉₅)
PBD 상 부			
	135 μ m×126 μ m	126 μ m×81 μ m	193 μ m×162 μ m
PBD 하 부			
	198 μ m×189 μ m	270 μ m×261 μ m	247 μ m×193 μ m

표 3. 필터재 입자투과시험을 통한 통과입자 크기(SEM, 100배율 및 300배율)

구 분	Filter- A	Filter- B	Filter- C
AOS	75 μ m(O ₉₅)	120 μ m(O ₉₅)	225 μ m(O ₉₅)
크 기	77 μ m×71 μ m	268 μ m×122 μ m	286 μ m×157 μ m
100배율			
			
300배율			

5.3 SEM 영상분석 결과

표 2는 내적 막힘현상이 발생한 배수재 내부에서 채취한 시료를 SEM으로 촬영한 결과로써 배수재 내에 침전된 토립자 중 필터재의 AOS보다 큰 토립자가 존재하는 것으로 나타났다. 300배 확대된 결과

에서 보는 바와 같이 75 μ m의 AOS를 가지는 PBD-A에서는 126~198 μ m의 크기를 가지는 토립자가 관찰되었으며, 120 μ m를 가지는 PBD-B에서는 최대 270 μ m 크기도 찾아 볼 수 있었다. 또한 PBD의 상부보다는 하부에서 큰 직경의 입자가 쉽게 관찰되었으며, 필터재를 통과한 토립자 중 크고 무거운 입자가 침전되어 배수재 하부에 적체되었기 때문인 것으로 판단된다.

필터재 입자투과시험에서 필터재를 통과한 토립자에 대해서도 SEM 영상 분석을 실시하였으며, 표 3에서 보는 바와 같이 AOS가 120 μ m인 Filetr-B의 경우, 122~268 μ m 크기의 입자가 쉽게 발견 되었으며 이러한 현상은 Filter-C에서도 동일하게 나타났다. 100배율의 SEM 분석 사진에서 보듯이 동일한 면적에 대해 AOS가 큰 Filter-C를 통과한 시료에서 큰 입자의 비율이 높은 것으로 나타났다. 따라서 AOS가 큰 필터재를 사용할수록 큰 입자의 유입이 많아지며 배수재 내부로 유입되는 토립자의 질량도 커지게 된다. 입자가 크고 무거울수록 외부로 배출되기 어렵기 때문에 좌굴 및 꺾임이 발생된 부분이나 배수재 하부에 침전될 가능성이 높아진다. PBD공법을 적용하기 앞서 적절한 연직배수재를 선택하여야 AOS에 의한 내부막힘 현상을 줄일수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 크기, 형태 및 AOS가 다른 4종류의 연직배수재를 대형 슬러리 압밀시험기에 설치하고 압밀이 종료된 이후 배수재 내부에서 발생하는 막힘현상을 확인하였으며, 필터재 입자투과 시험기를 이용하여 필터재의 AOS 크기에 따른 유입 토립자의 크기와 양상을 SEM 영상분석으로 관찰하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 단위시간당 배수량은 PBD의 종류에 따라 큰 차이는 없으나 배수재의 두께가 두껍고 하모니카형 코어를 가진 배수재가 다소 우수한 것으로 나타났다. 그러나 4개의 PBD 모두 좌굴(bending)에 의한 영향이 없는 배수 초기 36시간 이내에 큰 폭의 배수량 감소가 발생하는 것으로 나타났다.
2. 시료 전체 높이의 25%가량이 압밀된 시점에서 PBD를 채취하여 토립자에 의해 발생된 침전현상을 육안으로 확인한 결과, 배수재의 하부로 갈수록 유입 토립자의 양이 증가하며, 꺾임 현상이 발생된 부위에서는 유입된 흙입자가 외부로 배출되지 못하고 침전되어 코어 유로를 차단하고 있는 것으로 나타났다.
3. 필터재의 AOS는 같고 코어의 형상이 다른 경우 막힘현상은 유사하게 나타나 배수재 코어의 형상에 따른 영향은 없는 것으로 분석되었다.
4. 배수재 내부로 유입된 토립자를 SEM으로 촬영한 결과, 필터재의 AOS보다 큰 직경의 토립자가 관찰 되었으며 직경이 큰 입자는 간극수와 함께 외부로 배출되기 어렵기 때문에 좌굴 및 꺾임이 발생된 부분이나 배수재 하부에 집중적으로 침전되는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-D01067).

참고문헌

1. 강민수, 이진태, 김수삼, 장연수 (1988), "Plastic Drain Board의 배수성능에 관한 실험적 연구(II)", 1998년도 대한토목학회 학술발표회, pp.339-342.

2. 김래현, 심민보, 나영목, 이우진, 김태준 (2005), “PBD의 내적막힘 가능성 연구”, *2005 Joint Symposium of ISSMGE ATC-7 & KGS TC, Busan, Korea*, pp.165-172.
3. 신은철, 박정준, 김종인 (2005), “영향인자를 고려한 연직배수재의 통수능 평가”, 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제9호, pp.13-23.
4. Barron, R. A. (1948), “Consolidation of fine-grained soils by drain wells”, *Transactions ASCE*, Vol. 113, No. 4, pp.718-742.
5. Hansbo, S. (1981), “Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains”, *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, pp.677-682.
6. Lawrence, C. A., and Koerner, R. M. (1988), “Low behavior of kinked strip drains geosynthetics for soil improvement”, *ASCE Geotechnical Special Publication*. Vol. 18, pp.22-35.
7. Onoue, A. (1988), “Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consolidation”, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 4, pp.165-174.
8. Yoshikuni, H., and Nakanodo, H. (1974), “Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability”, *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, pp.35-46.