

## 자연친화형 연약지반개량공법을 위한 천연섬유배수재의 특성 연구

김주형<sup>1)</sup> · 조삼덕<sup>1)</sup> · 장연수<sup>2)</sup> · 김수삼<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 지반연구부 · <sup>2)</sup> 동국대학교 토목공학과 · <sup>3)</sup> 한양대학교 건설환경시스템공학과

### Characteristics of the Natural Fiber Drain Board for Environmentally Friendly Soil Improvement Method

**Kim, Ju Hyong<sup>1)</sup> · Cho, Sam-Deok<sup>1)</sup> · Jang, Yeon-Su<sup>2)</sup> and Kim, Soo Sam<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup> Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Construction Technology,

<sup>2)</sup> Department of Civil Engineering, Dongguk University,

<sup>3)</sup> Department of Civil and Environmental System Engineering, Hanyang University.

#### ABSTRACT

The recent environmental protection issue has diminished the supply of sand for soft ground improvements so much that the prices of sand have shown a sudden rise. Plastic material is one of substitutes for sand material, but plastic is nonperishable and doubtful if it has potential environmental hormone disrupting substances. Moderate-priced natural fiber drain board made with coconut coir and jute filter are in the spotlight recently as an alternative material for sand and plastic drain board etc. Natural fiber drain has not only competitive price but also a characteristic of assimilation into the soils after finishing of its own function. Discharge capacity of the fiber drain board evaluated by triaxial type discharge capacity test was relatively lower than that of plastic drain board. Nevertheless, settlement and pore pressure dissipation behaviors of the fiber drain board and the plastic drain board which were installed in the clayey soil during the composite discharge capacity test were almost similar. It was also found that biodegradation of the fiber drain board was in progress until 18 month after installation in the clayey soil, but they had still enough engineering properties to use at field.

Key Words : *Fiber drain board, Plastic drain board, Discharge capacity, Tensile strength, Permittivity.*

---

**Corresponding author** : Kim, Ju Hyong, Department of Geotechnical Engineering Research,  
Tel : +82-31-910-0236, E-mail : haitink@kict.re.kr

## I. 서론

최근 연약 또는 초연약지반상에 모래나 점토 등을 준설하여 대규모 항만, 공항, 신도시, 공업단지 조성을 위한 연약지반개량공사가 활발하게 이루어지고 있다. 우리나라에 분포하는 연약지반은 해성점토, 실트질 점토, 유기질토 등으로 구성되어 있어 도로, 항만 등의 구조물 건설시 지내력 부족이나 장기침하 등의 구조물 안정성 문제가 발생할 가능성이 크지만 국토의 효율적인 활용면에서 불가피한 선택이라고 할 수 있다. 국내에서 가장 널리 사용되는 연약지반 개량방법으로는 그림 1에 나타낸 것과 같이 연약한 점성토 지반내에 인공적으로 연직배수체를 다수 설치하여 배수 거리를 단축시켜 지반의 압밀침하를 촉진시키는 공법이 있다.

연직배수공법에 사용하고 있는 재료로서는 모래와 플라스틱이 대표적인데, 모래를 사용하는 방법으로는 샌드드레인(Sand Drain)공법, 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, SCP)공법, 샌드팩드레인(Sand Packed Drain)공법 등이 있으며, 인공재료를 사용하는 방법으로는 플라스틱드레인보드 (Plastic Drain Board, PDB)공법 등이 있다. 샌드드레인공법, 모래다짐말뚝공법, 샌드팩드레인공법 등은 최근 모래 수급의 어려움으로 가격이 계속 상승하고 있는 실정이며, 또한 환경단체 등에서 모래채취에 따른 자연생태계 파괴문제 등의 문제점을 계속 지적하고 있는 실정이다. 따라

서 현재 국내에서는 품질관리와 시공성 및 경제성이 우수한 PDB 공법이 연약지반 개량공사의 70~80% 정도를 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 PDB 공법의 우수한 배수 성능에도 불구하고 합성수지로 만들어져 있기 때문에, 지반 내에 설치된 후 매우 오랜기간 동안 썩지 않아 환경오염을 유발하는 단점이 있다. 또한 PDB가 설치된 지반에서 추후 필요에 의해 굴착 등을 수행하는 경우에는 PDB를 모두 뽑아내어야 하며, 이를 소각하는 경우 2차적인 환경오염을 일으킬 가능성도 있다.

최근 일본과 동남아시아를 중심으로 일정기간 동안 설계자가 원하는 배수성능을 가지지만, 일정기간이 경과하면 흙으로 동화되는 새로운 자연친화적인 배수공법에 대한 연구가 수행되고 있는데, 국내에서는 아직 자연친화적인 재료를 이용하는 배수체에 대한 연구 및 적용사례가 매우 미미한 실정이다. 본 연구에서는 황마와 코코넛껍질의 천연섬유재료를 이용한 연직배수용 친환경배수체에 대한 특성을 분석하여 기존에 연직배수체로 많이 사용하고 있는 PDB와 비교 분석하였다.

## II. 플라스틱드레인보드(PDB)와 천연섬유배수재(FDB)

### 1. 플라스틱드레인보드(PDB)

플라스틱드레인보드(PDB)의 종류와 형태는 매우 다양한데, 일반적으로 그림 2에 나타낸 것과 같은 폭 10cm 정도의 고강도 폴리프로필렌

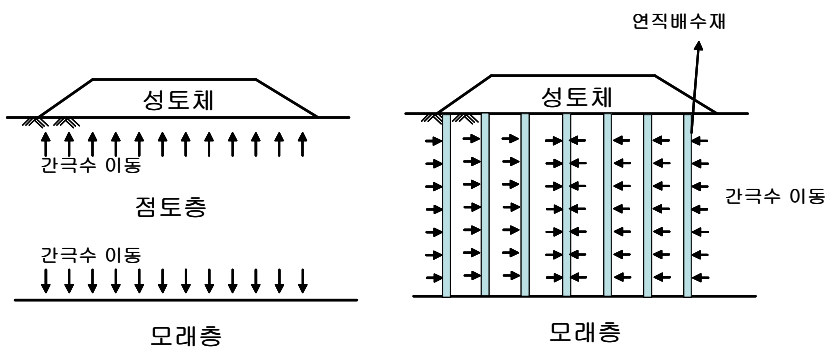


그림 1. 연직배수공법의 원리.



그림 2. 하모니카형 코어의 플라스틱드레인보드(PDB).

코어(Polypropylene Core)와 열융합 부직포 필터를 결합한 포켓형 제품을 많이 사용하고 있다. PDB의 일반적인 두께는 10 mm이하이며, 필터의 유효구멍크기는 50 $\mu$ m~120 $\mu$ m 정도이다. 배수재 코어는 유로확보를 위해 하모니카형과 요철형으로 제작되어 있다.

2. 천연섬유배수재(FDB)

천연섬유배수재(Fiber Drain Board, FDB)는 그림 3에 나타난 것과 같이 세립토의 유입을 방지하고 물의 유입만을 허용하는 황마필터와 배수재 내부의 물을 외부로 배출하는 역할을 하는 코코넛 껍질 외피코어로 구성이 되어 있다. FDB에서 사용하는 황마필터는 PDB에서 사용하는 필터와는 달리 직포로 구성되어 있기 때문에 2겹의 황마필터를 사용하여 부직포와 비슷한 필터효과를 발휘하도록 제작되어 있다. 또한, 물의 흐름을 유지하기 위해 4줄의 야자로프 코어를 균등한 간격으로 배열하고 각 로프사이가 연속으로 봉합되어 있다. 일반적인 FDB의 규격은 폭 90mm( $\pm$ 15mm), 두께

는 9mm ( $\pm$ 1.5mm)정도이며, 코코넛 코어는 야자 열매의 껍질 외피 섬유를 5mm( $\pm$ 2mm) 직경의 로프식으로 꼬아 만든 것을 사용하고 있다.

III. 천연섬유배수재의 공학적 특성 평가

1. 인장강도

연직배수재는 공장에서 현장으로 운반시 둥근 롤(roll) 형태로 감거나 팩(pack) 형태로 포장되어 운반된다. 현장에 운반된 연직배수재는 그림 4와 같은 장비를 이용하여 지반에 설치하게 된다. 이때 지반 속으로 관입되거나 인발될 때 연직배수재는 설치 장비에 의해 상당한 인장력을 받게 되어 부분적으로 또는 전체적으로 절단될 가능성이 매우 높다. 또한, 지반에 설치된 연직배수재는 지반과 같이 거동하게 되어 지반침하에 의해 부분적으로 인장력을 받는 경우가 있을 수 있는데, 연직배수재가 인장력에 의해 절단되지 않게 하기 위해서는 어느 정도의 인장력을 가져야 하며 국내외의 시방 기준에서는 0.5~1kN/폭 정도의 최



그림 3. 천연섬유배수재(FDB).



그림 4. 연직배수재 설치 장비.

소 인장강도를 갖는 연직배수재를 사용하도록 하고 있다.

본 연구에서는 연직배수재의 인장특성을 분석하기 위해 그림 2에 나타난 PDB와 그림 3에 나타난 FDB를 대상으로 인장강도시험을 수행하고 비교 분석하였다. 국내에서는 기존 연직배수재에 대한 인장강도시험법으로 스트립(strip)법 또는 그랩(grab)법 등을 혼재하여 사용하고 있으며, 연직배수재에 대한 시험법들이 아직 명확하게 확립되어 있지 않은 상태이다. 본 연구에서는 연직배수재의 인장강도를 ASTM D5035 “Standard Test Method for Breaking Force and Elongation of Textile Fabrics (Strip Method)”를 준용하여 시험하였다.

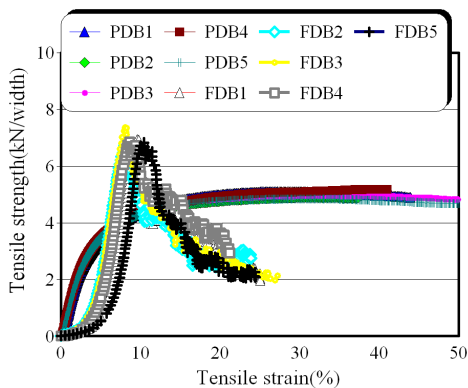


그림 5. PDB와 천연섬유배수재의 인장강도.  
(일반적인 보관 상태)

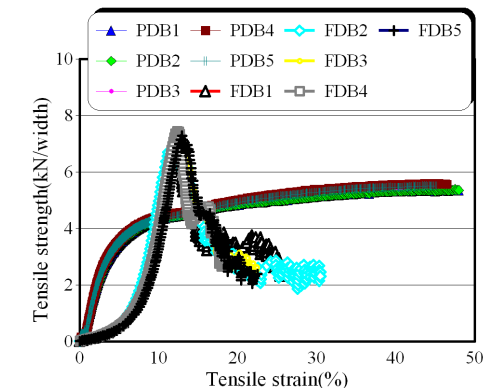


그림 6. PDB와 천연섬유배수재의 인장강도.  
(습윤상태)

그림 5와 그림 6은 PDB의 인장시험 결과와 FDB의 인장강도 시험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 5는 창고 안에 적재되어 있던 PDB와 FDB를 각각 5회씩 시험하여 나타낸 인장강도 결과이며, 그림 6은 PDB와 FDB를 물에 24시간 침수시킨 후에 꺼내어 인장강도를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 두 그림에서 보면 PDB의 경우에는 변형률-인장강도 곡선이 최소변곡점이 지나더라도 변형률이 증가함에 따라 인장강도는 계속 증가하거나 일정값을 유지하는 양상을 나타내고 있다. 반면에 FDB의 최대인장강도는 PDB보다 1~3kN/폭 정도 큰 것으로 나타났고, 최대인장강도 발현시의 변형률은 10% 내외의 값을 나타내었다. 따라서, FDB는 PDB보다 다소 큰 인장강도를 나타내고 있는 반면에 최대인장강도 발현 후 바로 절단되는 단점이 있는 것으로 나타났다. 그러나 강민수 (1998)는 국내에서 사용되고 있는 배수재 설치 장비를 대상으로 연직배수재에 가해지는 인장강도를 이론적으로 산정한 결과 0.2kN/폭 정도 작용한다고 언급한 바 있는데, 이와 같은 결과를 근거로 한다면 두 배수재 모두 설치시 장비에 의한 배수재 절단 가능성은 매우 낮을 것으로 판단된다.

또한, 일반적인 보관상태의 PDB와 습윤상태의 PDB의 인장강도의 차이는 크지 않은 반면에 천연섬유로 구성되어 있는 천연섬유배수재는 물

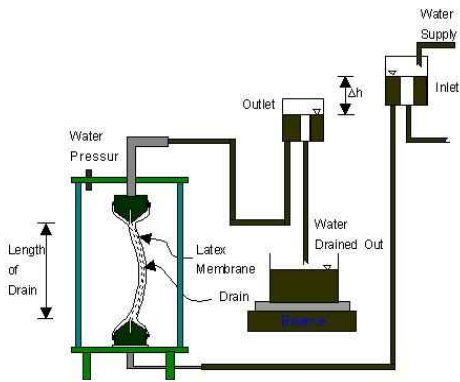


그림 7. 삼축형 통수능시험기.



을 함유하는 경우가 물을 함유하지 않은 경우보다 약 5~10% 정도 최대 인장강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 최대인장강도 발현시의 변형률도 물을 함유하지 않는 경우에 비해 약 2~3% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 물이 천연섬유배수재에 흡수되면서 섬유분자들의 결합을 강화하기 때문이며, 상대적으로 물을 흡수하지 않는 플라스틱재료의 PDB는 물에 의한 인장강도의 증감은 없는 것으로 나타났다.

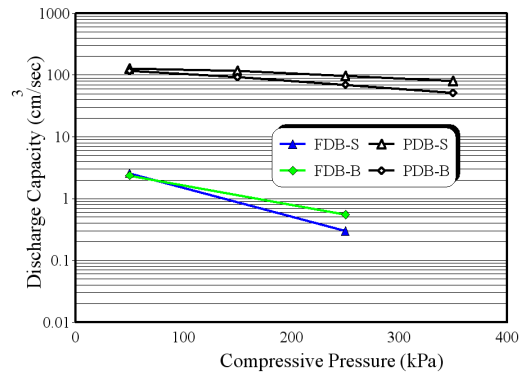


그림 8. 삼축형 통수능 시험 결과.

## 2. 통수능 평가

### 1) 삼축형 통수능시험

대부분 국내에서 사용되고 있는 연직배수재의 통수능은 그림 7에 나타낸 것과 같은 삼축형 통수능 시험기를 이용하여 평가하고 있다. 이 시험 방법은 삼축압축시험의 원리를 이용하여 지반에 설치되어 있는 배수재의 성능을 평가하기 위해 고안된 시험방법으로 배수재를 고무 멤브레인으로 감싼 후 셀 내부에 물이나 공기로 구속압을 가한 상태에서 배수재를 통해 종방향으로 흘러나오는 통수량을 측정하여 연직배수재의 통수능을 평가한다. 또한, 상판을 통해 배수재 상부와 연결되는 로드(rod)를 조절하여 배수재를 임의로 굴곡시킨 상태에서의 통수능 측정이 가능하며, 지반의 침하와 함께 변형되는 배수재의 굴곡에 따른 통수능 감소효과를 고려할 수 있다.

그림 8은 삼축형 통수능 시험으로 구한 PDB와

FDB의 통수능 시험 결과이다. 여기에서 PDB는 직선(PDB-S)상태로 시험한 경우 80~120cm³/sec, 25% 변형의 굴곡(PDB-B)상태로 시험한 경우 50~115cm³/sec의 통수능이 산정되었으며, FDB보다 상대적으로 훨씬 큰 통수능을 보이고 있다. 직선 상태의 천연섬유배수재(FDB-S)와 굴곡 상태의 천연섬유배수재(FDB-B)의 통수능은 PDB의 통수능보다 상대적으로 작으나 배수재의 굴곡 여부와는 상관없이 통수능의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 반면에 PDB의 경우에는 비록 FDB보다는 절대적으로 큰 통수능을 나타내지만 상대적으로 직선상태보다 굴곡상태시에 통수능이 더 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 250kPa의 압력이 가해질 때 PDB를 직선상태로 시험한 경우 통수능은 96.7cm³/sec이지만, 곡선상태로 시험한 경우 통수능은 70cm³/sec로 통수

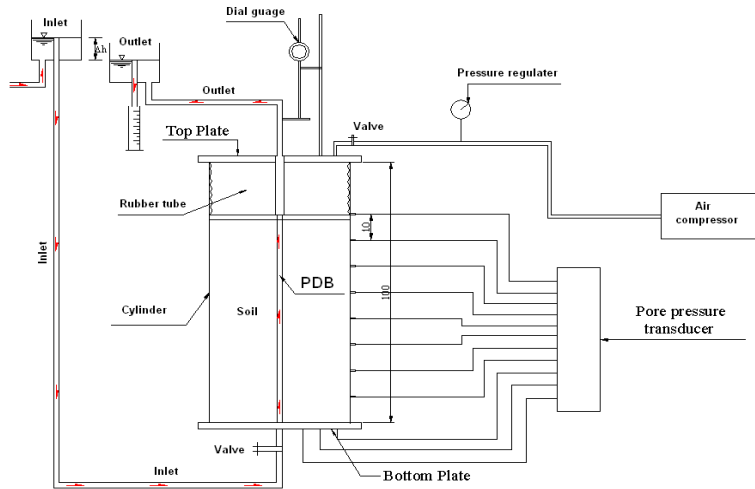


그림 9. 복합통수능시험기 모식도.

능이 감소하는 반면에, FDB를 직선으로 시험한 경우 통수능은  $0.3\text{cm}^3/\text{sec}$ 에서 곡선상태에서는 오히려  $0.5\text{cm}^3/\text{sec}$ 로 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다. 실제로 휨강성이 매우 작은 PDB는 지반 속에 삽입되어 압밀배수가 발생하는 동안 지반침하로 인한 접합, 절곡 또는 kinking 현상 등과 같은 배수재 통수능 저하에 큰 영향을 미치는 요인들이 상대적으로 휨강성이 큰 FDB보다 발생할 가능성이 높다. 그림 7에 나타난 삼축형 통수능 시험에서는 이와 같은 실제 상황을 제대로 모사하기 어렵기 때문에 비록 PDB가 큰 통수능이 평가되었다 하더라도 앞서 언급한 여러가지 요인들에 의해 급격히 감소할 가능성이 FDB보다 높다. 이를 확인하기 위하여 본 연구에서는 실제 지반을 가깝게 모사할 수 있는 복합통수능시험을 통해 PDB와 FDB의 실제 지반에서의 거동을 예측 분석하였다.

## 2) 복합통수능시험

복합통수능시험기는 배수재의 내적·외적 막힘현상과 크리프 등을 고려할 수 있도록 기존 배수재 통수능시험 장치를 개선한 것으로 그림 9와 같은 개념의 시험기이다. 본 연구에서 사용된 복합통수능시험기는 직경 50cm, 높이 100cm의 원

통형 강재 프레임으로 제작되었으며, 배수재 길이 조절 및 시료타설과 해체의 용이성을 위해 3단으로 분리되도록 구성된 시험장치이다. 시험기 측면에는 간극수압 측정 포트(Port)를 10cm 간격으로 설치하였으며, 하부 바닥에는 배수재로부터 일정거리 떨어진 위치에서 간극수압을 측정하기 위해 3개의 포트(Port)를 설치하여 압밀진행에 따른 간극수압 소산을 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 동수경사( $i$ ) 조절을 위한 장치로 유출수조와 유입수조가 있어 유입수조에서 배수관로를 통해 유입된 물이 시험기 하부를 통해 배수재 내부로 유입되어 상부 배수관로를 통해 유출수조로 나오게 되며 이때의 물의 유출량을 측정하도록 설계되어 있다.

본 시험에서 사용한 흙 시료는 남해안 광양지역에서 채취한 해성 점성토를 사용하였는데, 시험에 사용할 불교란 시료를 확보하는 것이 매우 어렵기 때문에 교란된 상태의 시료를 채취하여 실내시험실에서 습윤상태의 흙을 No. 10체로 체가름한 것을 사용하였다. 이 과정 중 실험결과에 영향을 미칠 정도의 크기가 큰 흙이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하였다. 이와 동시에 시료 채취지점과 동일한 위치에서 운반되어온 해수를 첨가하여 입자간의 포화도를 높이면서 액성한계

표 1. 실험에 사용된 점토시료의 특성.

분 류	값	분 류	값
흙 분류	CL	액성한계 (LL)	47±2%
200번체 통과율	98%	소성한계 (PL)	26±2%
비중	2.64	소성지수 (PI)	21±2%
압축지수 (Cc)	0.49	팽창지수 (Cs)	0.09

의 2배 정도(92%)의 함수비를 갖는 고탍수비 상태로 시료를 준비하였다. 본 시험에서 사용된 점토시료의 특성을 표 1에 제시하였다. 시험에 사용한 점토 시료는 비중 2.64, 액성한계 47(±2)%, 소성지수 21(±2%)이며 통일분류법상 저소성 점토(CL)로 분류된다.

그림 10은 복합통수능 시험기를 이용하여 배수재를 설치하지 않은 지반과 PDB 및 FDB 설치 지반에 측정된 침하량 변화를 도시한 것이다. 배수재를 설치하지 않은 지반에 비해 배수재를 설치한 지반의 경우 시간 경과에 따른 침하량이 크게 나타나고 있어 연직배수공법에 의한 압밀촉진 효과가 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그림 11에는 배수재 설치 지반에서 시간에 따른 측벽과 하부에서의 간극수압 변화를 도시한 것으로 초기 2.5kg/cm<sup>2</sup>까지 재하하고 안정화를 위해 3일 동안 방치시키는 과정에서 두 시험조건 모두 측벽과 하부에서 2.5kg/cm<sup>2</sup>에 근사한 값의 과잉 간극수압이 발생하였으며, 이후 배수조건을 구현함과 동시에 시간에 따른 간극수압 소산 경향이

뚜렷이 나타나고 있다.

이 두 그림에서 주목할 점은 앞선 삼축형 통수능시험에서 현저히 통수능 차이를 나타낸 PDB와 FDB가 복합통수능시험 결과에서는 두 배수재 설치지반에서 측정된 침하량과 간극수압 소산 속도에 큰 차이를 나타내고 있지 않다는 사실이다. 배수재의 통수능이 큰 PDB 설치 지반의 침하속도가 FDB가 설치된 지반에 비해 빨라야 하지만, 실제 복합통수능시험결과는 PDB와 FDB 설치 지반에서의 침하량과 간극수압 소산속도가 유사하게 나타났다.

그림 12에는 복합통수능으로 평가한 두 배수재의 통수능 변화를 나타낸 것으로 초기 압밀 발생시에 두 배수재 사이에는 큰 통수능 차이가 있었지만, 압밀이 진행됨에 따라 두 배수재의 통수능이 비슷해지는 결과를 나타내고 있다. 압밀도 75%에서 PDB의 통수능은 6.1cm<sup>3</sup>/sec, 천연섬유 배수재의 통수능은 4.7cm<sup>3</sup>/sec로 나타났다. 이와 같은 시험 결과로부터 연직배수공법에 의한 지반 개량 효과를 얻기 위해서는 최소 요구통수능력이 이상만을 만족하면 가능할 것이라 추정할 수 있다. 본 시험과 유사한 조건에 대해 Hansbo(1986), Rixner et al.(1986), Koda et al.(1986) 등은 배수재에 필요한 최소 요구통수능 값을 대략 3~4cm<sup>3</sup>/sec 이상으로 제시하고 있는데, 복합통수능 시험으로 PDB와 FDB의 통수능을 평가한 결과 PDB와 FDB는 모두 이들이 제시한 기준을 만족하고 있다. 즉, 연직배수공법의 효과적인 설계를

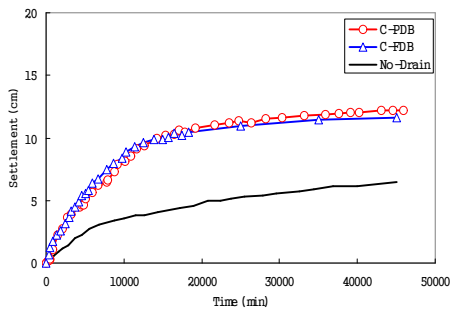


그림 10. 표면침하량 변화.

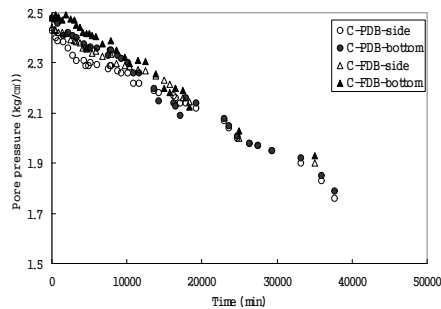


그림 11. 간극수압 변화.

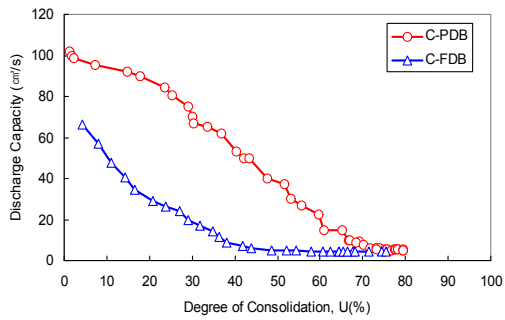


그림 12. 복합통수능으로 평가한 배수재의 통수능 변화.

위해서는 배수재의 최소 요구통수능 평가가 매우 중요하다고 할 수 있다.

그림 13과 그림 14에는 복합통수능 시험이 종료된 후 시편을 수직으로 이등분하여 살펴본 PDB와 FDB의 굴곡형상을 관찰한 것이다. PDB의 경우에는 육안으로 보기에 상당한 휨이 발생하였고 원 안에 표시한 부분에서는 부분적으로 절곡된 부분이 관찰되었다. 반면에, FDB는 통수능에 영향을 미칠 정도의 심한 접힘은 관찰되지 않았으며 다만 굽힘 보다는 약간의 뒤틀림 현상을 보였다. 실제 PDB에서 관찰된 절곡 부분은 시간에 따른 배수재 통수능 저하에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 이와 같이 복합통수능시험은 비록 시험기 크기면에서는 한계가 있는 시험이지만 실제 흙을 이용하여 배수재의 통수능

을 평가하기 때문에 실제 현장 상황을 더 잘 평가할 것으로 판단할 수 있다.

그림 12에 나타난 압밀도 증가에 따른 통수능 감소의 원인으로서는 지반 침하에 따른 배수재의 굴곡현상 뿐만 아니라 현장에 타설된 배수재의 필터 막힘 현상으로 일부 설명할 수 있다. 즉, 삼축형 통수능시험과는 달리 복합통수능 시험시 시험 대상 배수재의 필터 외측에는 흙이 접하게 되고, 상재하중 작용으로 인한 간극수의 방사방향 흐름과 함께 이동한 토립자가 배수재 필터에 결집하여 유로를 차단함으로써 통수능 감소는 물론 연직배수공법의 효과를 저감시키는 원인으로 작용하게 된다. 이러한 현상은 점토입자의 응집 측면에서 Filter Cake이라 하며, 필터의 공극에 토립자가 결집되어 발생하는 현상을 필터막힘(Clogging)이라 정의하고 있다. 실제로 광학현미경을 이용하면 필터의 막힘현상을 대략적으로 파악할 수 있는데, 본 연구에서는 실험 후의 배수재 필터를 대상으로 각각 18배 광학현미경 촬영을 통해 배수재의 통수능 저감요인으로서의 필터막힘현상이 미치는 영향을 관찰하였다.

그림 15는 PDB 필터와 FDB에 사용되는 황마 필터를 복합통수능 시험 후 광학현미경으로 촬영한 것이다. 그림에서 보면 두 종류의 필터 모두 흙과 접해 있는 외측 부분 섬유입자 사이의 공극



그림 13. PDB의 굴곡형상.

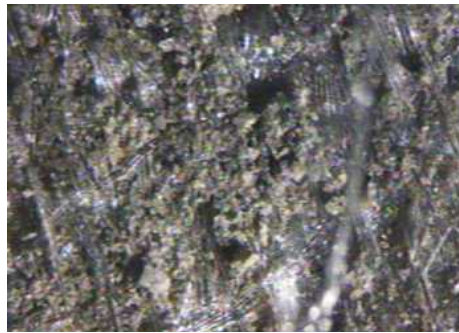


그림 14. 천연섬유배수재의 굴곡현상.





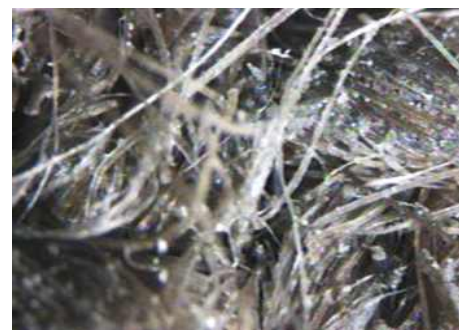
(a) PDB 필터 내측



(b) PDB 필터 외측



(c) 황마필터 내측



(d) 황마필터 외측

그림 15. 각 배수재의 광학현미경 사진.

에 상당량의 토립자가 결집되어 있는 것을 알 수 있었다. 또한 흙에 접해있지 않은 필터 내측 촬영 결과와 실제 점토가 접하고 있는 외측 촬영 결과를 서로 비교하면, 외측 부분에 상당히 많은 양의 점토입자가 응집되어 있는 것과는 달리 내측 부분은 그다지 많은 양의 점토입자가 발견되지 않고 있으며, 이러한 경향은 두 겹의 황마필터를 사용하는 천연섬유배수재에 있어서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다.

이와 같은 광학 현미경 사진 결과로 판단하면 필터의 외적 막힘현상도 복합통수능시험시 압밀도 증가에 따른 배수재의 통수능 저감에 한 영향 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

#### IV. 천연섬유배수재의 내구성

##### 1. 내구성 평가시험 종류 및 시험방법

FDB는 PDB와는 달리 지반내에 장기간 동안

문혀 있게 되면 생분해되는 천연섬유로 만들어져 있기 때문에 설계시에 이에 대한 고려를 해야 한다. 현재는 지반내에 설치된 FDB의 특성에 대한 뚜렷한 연구 결과가 없어, 이를 위해 흙 또는 해수 등에 매설한 FDB의 시간 경과에 따른 투수계수와 인장특성 변화를 평가하였다. 인장강도시험은 앞서 필터와 전체배수재의 인장강도 평가 방법인 ASTM D 5035를 근거로 시험을 수행하였다. 본 시험에서는 흙 또는 해수내에 0, 3, 9, 18개월 방치한 FDB를 꺼내어 FDB 인장강도의 경시변화를 관찰하였다.

또한 앞서 언급한 것과 같이 필터의 장기 투수성을 저하시키는 요인으로 필터의 막힘을 언급한 바 있는데, 시간 경과에 따른 황마필터의 부식정도와 투수성을 파악하기 위해 투수시험 (ASTM D 4491-99a)을 수행하였고 흙과 필터가 결합된 형태로 실제 지반에 타설된 배수재의 수리학적 거동을 평가하기 위하여 막힘을 고려한

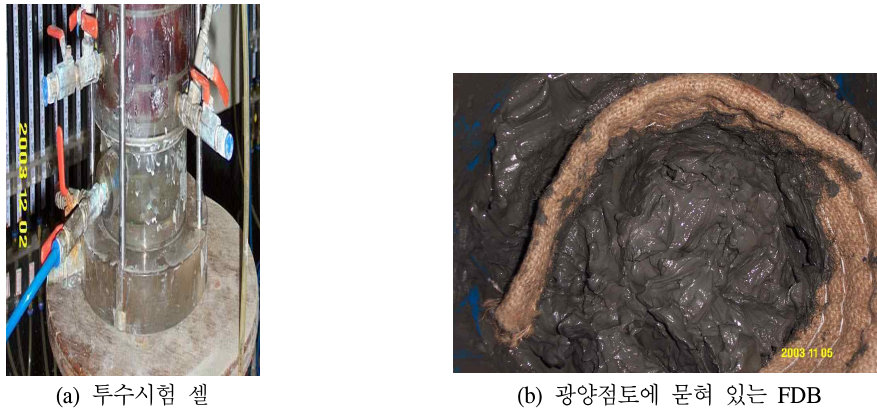


그림 16. 내구성 시험장치와 준비된 FDB.

흡/필터 투수시험(ASTM D 5101)을 0, 3, 9, 18 개월 동안 증류수, 해수, 점토에 방치한 황마필터를 대상으로 각각 실시하였다. 황마 필터의 투수시험은 일정 수위차( $\Delta h=10\text{cm}$ )를 유지하며 시험을 실시하였으며, 흡/필터 시험에 사용한 흡시료는 복합투수능시험에서 사용한 동일한 광양점토를 사용하였다. 그림 16은 시험에 사용된 투수시험 셀(cell)과 광양점토에 묻혀 있는 FDB를 나타낸 것이다.

## 2. 시간 경과에 따른 인장강도 변화 특성

그림 17은 증류수 및 광양에서 채취한 해수 그리고 광양 점토에 묻어놓은 FDB를 3개월, 9개월, 18개월 후에 꺼내어 인장강도 시험을 수행한 결과이다. 그림 17에서 보면 3개월 후의 결과를 제외하고 9개월 후와 18개월 후에 시험한 FDB는 증류수, 해수, 점토에 묻어 놓은 순서대로 강도저하를 나타내고 있다. 이는 증류수보다는 해수에서, 해수보다는 점토에서 상대적으로 천연섬유가 더 잘 분해되는 것을 의미한다. 이와 같이 시간에 따른 인장강도 감소에 대한 원인은 여러 가지로 추정할 수 있으나, 계절변화로 인한 온도변화를 한 원인으로 생각할 수 있다. 실제로 시료가 보관되어 있던 곳은 한겨울과 한여름의 온도차이가  $30^\circ\text{C}$  이상 차이가 나는 곳으로 최초로 FDB를 증류수, 광양해수, 광양점토에 묻은 것은 11월이었

고, 아직 한 겨울이었던 3개월 경과 후 2월에 수행한 FDB의 인장강도는 증류수에 묻어놓은 FDB를 제외하고 해수와 점토에 묻어놓은 FDB의 인장강도 저하 양상은 발견할 수 없었다. 그러나 한여름이었던 9개월 경과 후 증류수에 담가놓은 천연섬유배수재를 제외하고 해수와 점토에 묻혀있던 FDB의 인장강도는 최대 33%나 감소한 것으로 나타났다. 이로부터 9개월이 더 경과한 18개월 후의 FDB의 인장강도는 9개월 경과 후에 측정된 인장강도 값보다 감소하였으나, 3~9개월 사이에 나타난 인장강도의 변화처럼 큰 인장강도의 저하는 없는 것으로 나타났다. 증류수에 담가 놓은 FDB의 강도저하도 매우 눈에 띄는 현상으로 18개월이 경과하는 동안 꾸준한 인장강도 감소현상 나타나는 것을 알 수 있다.

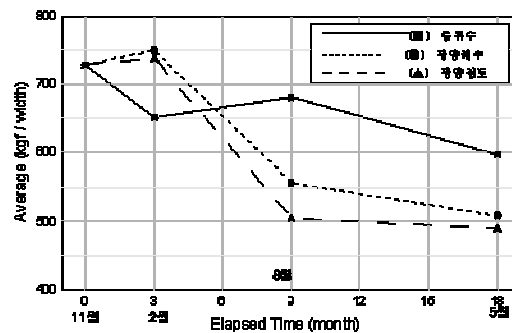


그림 17. 기간경과에 따른 광양시료 타설 배수재의 인장강도 변화.

### 3. 시간경과에 따른 투수성 변화특성

시간경과에 따른 황마필터의 투수성 변화 특성을 분석하기 위해 그림 16에 나타난 원통형 실린더 시험기에 상부는 광양점토를 채우고 하부에는 황마필터를 위치시킨 상태에서 동수경사( $i$ )를 10으로 하여, 물을 상부에서 하부로 흘러보내는 흡/필터 시스템 투수시험을 수행하였다. 흡/필터 시스템 사용한 황마필터는 인장강도시험에서 사용하였던 동일한 조건의 FDB에서 황마필터를 채취하여 시험을 수행하였다.

투수량은 각각 168~170시간 동안 측정하여 투수계수를 계산하고 그 결과를 시간에 따른 각 조건에 따라 구분하여 그림 18에 도시하였다. 그림 18에 도시한 투수계수는 기간과 각 조건에 흡/필터시스템 대한 투수계수가 일정한 값으로 수렴했을 때의 투수계수를 나타낸 것으로 0개월의 황마필터를 사용하는 경우의 흡/필터 시스템의 투수계수는  $1.6 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 가 측정된 반면에 3, 9, 18개월 경과후에는 투수계수가 미소하게 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 광양 흙에 묻어둔 황마필터는 해수나 증류수에 담가놓은 경우에 비해 투수계수가 더 작게 나타났다. 이는 황마로 제작된 필터재의 부패로 의해 미소하지만 섬유재의 격자간 틈이 커지게 되고 필터 위의 흡 입자가 필터재에 유입이 상대적으로 쉽게 되어 막힘 현상이 발생하는 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 9, 18개월 동안 흡 속에 방치해 놓은 황마필터가 시간이 흐를수록 시험 종료 후에 셀 하부 부분 물 속에 점토성분이 0개월의 필터를 이용하여 시험한 경우보다 더 많이 관찰되는 것으로도 간접적으로 알 수 있었다.

이와 같은 사실은 필터재 자체의 투수성을 평가하면 더욱 더 확실하게 알 수 있다. 지오텍스타일과 같이 매우 얇은 두께의 황마필터에 대한 투수특성은 투과거리에 대한 수두차, 즉 동수경사( $i$ )에 의해서 표현하는 Darcy의 투수계수로의 평가는 오류를 범할 수 있다. 따라서 배수재 위로 일정량의 물을 투과시켰을 때의 투과량에 대한

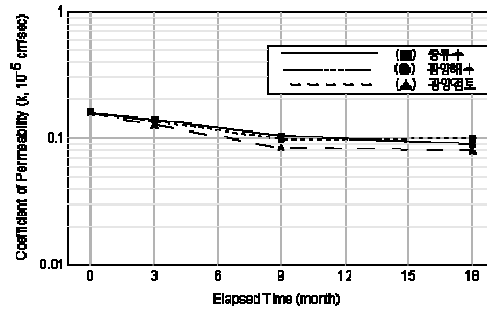


그림 18. 흡/필터 시스템을 이용한 시간경과에 따른 투수계수 변화.

투수성을 평가하는 것이 중요한데, 이는 permittivity로 표현된다. 본 시험에서는 ASTM 4491을 이용하여 황마필터의 permittivity( $\phi$ )를 산정하였으며 다음 식(1)을 이용하여 산정하였다.

$$\psi = \frac{K}{L} = \frac{Q}{\Delta h \times A}, (\text{sec}^{-1}) \quad (1)$$

여기서 Q= 투수량,  $\Delta h$ = 수위차, L= 투과거리, A= 투과면적 이다.

그림 19는 광양 흙과 해수, 증류수에 0개월, 3개월, 9개월, 18개월까지 묻어두었던 황마필터에 대한 permittivity 결과를 나타낸 것이다. 이 시험 결과는 수위차( $\Delta h=10\text{cm}$ )에 대한 결과를 나타낸 것이다. 각 조건별로 살펴보면 9개월 경과된 황마필터의 경우에는 증류수, 해수, 그리고 흙에 방치한 황마필터 순으로 점점 permittivity 값이 증가하고 있는데, 이는 흡/필터 시스템에서 구한 투수계수의 결과와 동일한 양상을 나타내고 있다. 이는 천연섬유가 인장강도시험의 경우와 마찬가지로 흙에 매설된 경우에 생분해로 인한 열화현상이 상대적으로 크게 나타난다는 것을 증명하는 것이다.

인장강도시험과 투수시험과 같은 물리적인 시험 결과를 모두 종합하면 점토 안에 압밀축진의 목적으로 설치되는 천연섬유배수재는 시간의 경과에 따라 인장강도와 흡/필터시스템의 투수계수는 감소하고 필터의 permittivity는 증가하는 것으로 나타나 시간 경과에 따라 흡 내부에서 천연섬

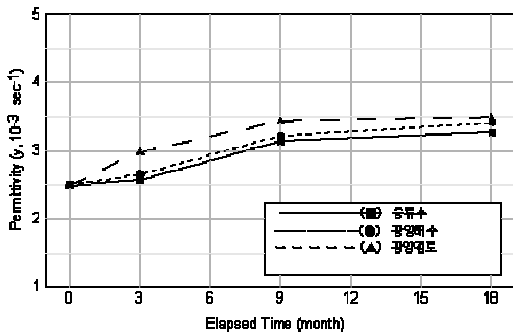


그림 19. 시간경과에 따른 황마필터의 permittivity 변화.

유배수재의 생분해가 점진적으로 진행되는 것을 알 수 있었다. 연직배수재를 이용한 지반개량공법은 일반적으로 2~3년내에 완료되는 것이 보통인데 광양 흙에 묻어놓은 천연섬유배수재의 경우 9개월까지는 급격한 인장강도와 투수계수의 변화를 나타내지만 이 후에는 완만한 변화를 나타내고 있어, 단기간 동안에 천연섬유배수재를 이용한 연약지반개량은 별 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

이와 같이 실내시험 결과를 통해 특성이 검증된 천연섬유배수재와 플라스틱 배수재에 대한 실제 현장에서의 특성 비교, 분석을 위해, 현재 현장 시험시공 중에 있으며, 추후 그 결과 분석을 통한 두 배수재의 현장 적용성 분석을 수행할 예정이다.

## V. 결 론

본 연구에서는 최근 각광을 받고 있는 천연소재의 연직배수재에 대한 특성을 분석하기 위해 공학적인 특성은 물론 시간 경과에 따른 내구성평가도 함께 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 천연섬유배수재의 인장강도는 기존 플라스틱으로 제작한 연직배수재의 인장강도보다 큰 값을 가지고 있어 시공 도중 또는 시공 후에 배수재에 가해지는 인장력에는 충분히 견딜 수 있을

것으로 판단된다.

2. 천연섬유배수재의 통수능 시험을 수행한 결과 삼축형 통수능시험으로 구한 FDB의 통수능은 PDB보다 매우 작은 값을 나타냈으나, 실제 지반을 유사하게 모사할 수 있는 복합통수능시험으로 구한 FDB의 통수능은 최종단계에서 PDB의 통수능과 비슷하거나 약간 작았다. 삼축형 통수능 시험의 경우에는 실제 지반에서 발생할 수 있는 배수재의 접힘 또는 절곡 등의 물리적인 현상과 필터의 막힘현상 등을 고려할 수 없기 때문에 PDB의 통수능이 FDB보다 더 크게 평가된 것으로 판단되며, 실제 현장 시공 상태를 가깝게 모사할 수 있는 복합통수능시험으로 평가한 두 배수재는 모두 최소 요구 통수능을 만족할 것으로 판단되었다.

3. 시간에 따른 FDB의 내구성을 평가한 결과 FDB는 증류수나 해수보다는 흙 속에서 열화가 더 빨리 진행되어 가고 있는 것을 확인하였다. 그러나 열화진행속도는 그리 빠르지 않아 18개월 후에 측정된 인장강도와 투수성능이 배수재 역할에 심각한 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

## 인 용 문 헌

- 장민수. 1998. 영향인자를 고려한 연직배수재기술의 개발에 관한 연구. 중앙대학교 박사학위 논문. 52-62.
- 한국건설기술연구원. 2004. 자연친화형 도로건설을 위한 친환경배수재 활용 연약지반 개량 기술연구(1). 03 건설기술기반구축사업 1차년도 연구보고서. 건설교통부.
- 한국건설기술연구원. 2005. 자연친화형 도로건설을 위한 친환경배수재 활용 연약지반 개량 기술연구(2). 03 건설기술기반구축사업 2차년도 연구보고서. 건설교통부.
- ASTM D4491. Test method for water permeability of geotextiles by permittivity.
- ASTM D5035. Standard test method for breaking

- force and elongation of textile fabrics(strip method).
- ASTM D5101. Standard test method for measuring the soil-geotextile system clogging potential by the gradient ratio.
- Hansbo, S. 1986. Preconsolidation of soft compressible subsoils by the use of prefabricated vertical drains. *Tijdschrift der openbare werken van België*. No. 6. 553-562.
- Koda, E., Szymansk, A., and W. Wolski. 1986. Laboratory tests on geodrains-durability in organic soils. Seminar on laboratory testing of prefabricated band-shaped drains. Milano. Italy. 22-23.
- Rixner, J. J., Kremer, S. R., and A. D. Smith. 1986. Prefabricated vertical drains. (2) : Summary of research effort. FHWA research report No. FHWA/RD-86/169. Washington.

接受 2005年 10月 14日