

## 연직천연섬유배수재를 이용한 연약지반 개량

### Soil Improvement using Vertical Natural Fiber Drains

김 주 형<sup>1</sup> Kim, Ju-Hyong  
조 삼 덕<sup>2\*</sup> Cho, Sam-Deok

#### ABSTRACT

A pilot test using environmentally friendly drains, was carried out to evaluate their applicability potential in the field. The pilot test site was divided into 5 different areas, with several combinations of vertical and horizontal drains installed for evaluation. Conventional natural fiber drains (FDB), new developed straw drain board (SDB) and plastic drain board (PDB) were used as vertical drains, while sand and fiber mats were used as horizontal drains. Surface settlement rates and excess pore pressure generation/dissipation tendency of PDB and FDB are almost identical except those of SDB. Cone tip resistance obtained from cone penetration test measured at the end of 1st consolidation stage for upper soft layer definitely increased irrespective of types of vertical drains. The monitoring and site investigation test data obtained at the pilot test site prove the vertical natural fiber drains can be used as substitutes of conventional plastic and sand material.

#### 요 지

친환경배수재에 대한 현장 적용성을 평가하기 위해 연직배수재와 수평배수재 설치 조합으로 현장시험시공을 수행하였다. 본 시험시공에서는 기존의 천연섬유배수재(FDB)와 새로 개발한 볏짚배수재(SDB) 그리고 플라스틱배수재(PDB)를 연직배수재로 설치하였으며, 화이버매트와 샌드매트를 수평배수재로 사용하였다. 볏짚배수재(SDB) 설치지역을 제외하고는 플라스틱배수재(PDB)와 천연섬유배수재(FDB) 설치 지역에서 측정된 지표침하발생속도와 과잉간극수압 발생/소산 양상은 거의 유사한 것으로 나타났으며, 1차 압밀방치기간동안 측정된 상부 연약층의 콘관입저항력도 설치된 연직배수재 종류와 상관없이 일정하게 증가한 것으로 나타나 천연섬유배수재가 기존의 플라스틱이나 모래재료를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

**Keywords :** Vertical drain, Surface settlement, Excess pore pressure, Pilot test, Degree of consolidation

#### 1. 서 론

국내외에서는 샌드드레인, 모래다짐말뚝공법, 샌드팩드레인공법 및 플라스틱드레인보드 공법 등 다양한 종류와 형태의 연약지반 개량용 연직배수재가 개발되어 사용되고 있다. 이 중 천연골재인 모래를 사용하는 샌드드레인, 모래다짐말뚝공법 그리고 샌드팩드레인공법 등은 깊은 심도까지 연약지반을 개량할 수 있다는 장점에도 불구하고 환경적 요인으로 인한 모래수급의 문제점과 이로 인한 가격

상승으로 인해 상대적으로 경제적이고 품질관리가 용이한 플라스틱드레인보드(Plastic Drain Board, PDB)로 상당수 대체되고 있는 실정이다. 그러나 플라스틱드레인보드는 얇고 쉽게 구부러지기 때문에 지반변형으로 인한 배수재 꺾임 현상으로 배수 성능이 저하되는 등의 문제점들이 지속적으로 지적되고 있다. 이 뿐만 아니라 배수재의 재질이 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리에스테르(PET) 등의 썩지 않는 석유화학 제품으로 구성되어 있어 지반개량재로서의 역할이 종료된 후에도 반영구적으로 지반 속

1 정회원, 한국건설기술연구원, 토질및기초연구실, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Earth Structure & Foundation Engineering Research Division, KICT)

2\* 정회원, 한국건설기술연구원, 토질및기초연구실, 책임연구원 (Member, Research Fellow, Earth Structure & Foundation Engineering Research Division, KICT, E-mail: sdcho@kict.re.kr)

에 묻혀있게 되어 장기적으로 환경적인 문제가 될 수 있을 뿐만 아니라, 추후 개량지역에 지하공동구나 배수구 등의 지하구조물 건설시 배수재의 절단곤란에 따른 굴착시공의 어려움 및 배수재의 폐기처리문제 등이 발생 가능성이 있다. 기존 배수공법의 경제적, 환경적인 문제점들을 보완하기 위해 최근에는 일정기간 동안 제 기능을 하다가 일정기간이 경과되면 자연으로 동화되는 천연섬유나 옥수수 등에서 추출한 폴리락틱 산 (Polylactic acid) 등을 이용한 친환경 연직배수재들이 속속 등장하고 있다. 그러나, 이와 같은 천연배수재들에 대한 시공은 일본과 동남아 지역에서 현장시공을 통한 경제성, 현장 적용성을 인정받고 있으나, 국내에는 현장 시공실적이 전무하다. 본 연구에서는 천연섬유를 이용하여 제작한 자연친화형 천연섬유배수재에 대해 국내 최초로 시험시공을 수행하였으며 그 결과를 분석하였다.

## 2. 천연섬유배수재

친환경 배수재의 개발은 1979년 싱가포르 국립대학의 Lee 교수팀에 의해 최초로 개발되었다. 이들이 개발한 천연섬유배수재(Fiber Drain Board, FDB)는 코코넛 열매껍

질에서 추출한 실을 꼬아 만든 코이어(Coir)를 배수로 확보를 위한 코어로 하고 이를 황마섬유(Jute)로 감싸 점성토 내의 과잉간극수만 배수재 내부로 흘러들어들 수 있도록 이중 필터로 구성되어 있다 그림 1에 나타낸 것과 같이 배수재의 폭은 약 80~110mm이며 두께는 코이어 코어의 설치로 인해 굴곡이 있어 약 4~20mm 정도이다. 최근에는 국내에서 생산되는 벚짚을 재활용한다는 차원에서 배수재 코어에 사용하는 야자껍질에서 추출한 코이어 대신 벚짚 새끼줄을 대신 사용하여 FDB와 모양과 크기가 유사한 벚짚배수재(Straw Drain Board, SDB)가 제작되기도 하였다. 두 배수재 모두 중량은 m당 250g 이상으로 플라스틱드레인보드에 비해 다소 무겁다. 본 연구에서는 다양한 방법으로 천연섬유배수재에 대한 품질시험을 수행하였으며 표 1에 제시된 기준을 만족하는 제품을 사용하였다.

## 3. 현장시험시공 현황

### 3.1 지반특성

천연섬유배수재에 대한 시험시공은 남해안 지역의 도로 건설지역으로 총 170m 구간에서 시험을 수행하였다.

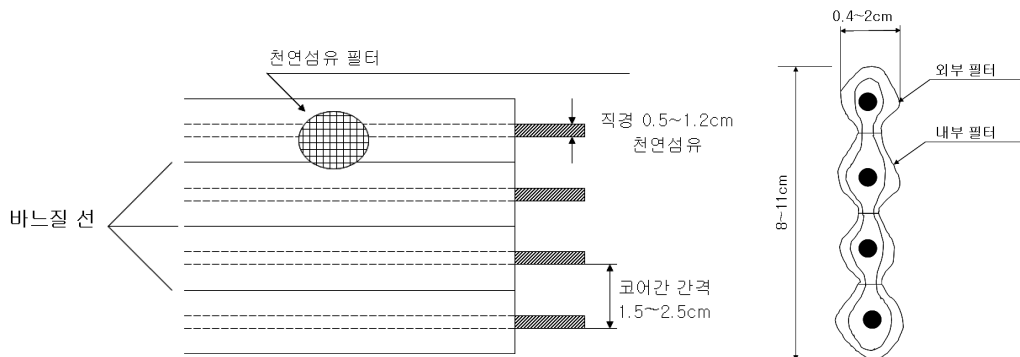


그림 1. 천연섬유배수재 상세도

표 1. 연직 천연섬유배수재 품질기준(한국건설기술연구원, 2007)

구분	항목	단위	기준(안)	
			값	시험방법
전체 배수재 (코어+ 필터)	배수성능	m <sup>3</sup> /year	150 이상	ASTM D 4716 @50kPa
	인장강도	kN/제품폭	5 이상 <sup>1)</sup>	KS K ISO 10319
필터	인열강도	kN	0.15 이상	KS K 0796
	파열강도	N	500 이상	KS K 0768
	인장강도	kN/m	9 이상 <sup>2)</sup>	KS K ISO 10319
	인장변형률	%	25% 이하 <sup>3)</sup>	KS K ISO 10319
	유속지수(V <sub>I450</sub> )	cm/sec	1.0 이상	KS K ISO 11058
	유효구멍크기(O <sub>90</sub> )	μm	500 이하 <sup>4)</sup>	KS K ISO 12956

이 지역 지반은 그림 2에 나타난 것과 같이 크게 5개의 지층으로 분류할 수 있는데, Clay A와 Clay C는 연약한 해성점토로 분류할 수 있으며, 이 두 점토층 사이에 3m 두께의 단단한 층 Clay B가 존재한다. Clay A는 N값이 0~5정도이며,  $q_c$ 값이 0.01~0.2MPa로 매우 연약한 것으로 나타났다. 특히 점토의 자연함수비가 60~72% 정도로 액성한계보다도 높은 것으로 나타나 Clay A는 매우 연약한 것을 알 수 있다. SPT와 CPT 수행 결과 상대적으로 단단한 층으로 나타난 Clay B의 액성한계는 33~56%으로, 자연함수비 24~42%보다는 큰 것을 알 수 있다. 동일하게 Clay C층의 액성한계는 33~48%로 동일지층의 자연함수비 33~43%보다 큰 것으로 나타났다. 이 세 점토층의 소성한계는 21~29%로 모두 비슷한 것으로 나타났다. 소성도표를 이용하여 각 지층의 특성을 분석한 결과 Clay

A는 매우 소성성이 높은 점토이며 Clay B와 Clay C는 낮거나 중간정도의 소성성을 갖는 점토로 판단된다. 표준압밀시험으로 구한 Clay A 층의 압축지수,  $C_c$ 는 0.59에서 0.79로 Clay C의 0.2~0.52 보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다. Clay A의 압밀계수는  $1.7 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec} \sim 34.3 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$  정도이며, 이는 Clay C 층의 압밀계수  $2.5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec} \sim 54.5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$  보다 작은 것으로 나타났다.

### 3.2 시공 현황

자연친화형 천연섬유배수재의 현장 적용성 분석을 위해 코코넛 코이어(coir)를 배수재의 코어로 제작한 천연섬유배수재(FDB)와 FDB와 크기, 모양이 모두 유사하지만 배수재의 코어를 벗겨서로 제작한 벗겨배수재(SDB) 등 두 종류의 천연섬유배수재 그리고 국내에서 가장 많이 사용되고 있는 플라스틱배수재(PDB)를 천연섬유배수재와 동일조건으로 시공하여 천연섬유배수재와의 연약지반개량 성능에 대한 비교 분석을 수행하였다. P-1과 P-2지역에는 PDB를, 그리고 F-4와 F-5지역에는 FDB를 1.4m 간격으로 정방형 형태로 설치하였으며, S-3지역에는 SDB를 1.2m 간격으로 설치하였다. P-1과 P-2지역은 다른 지역보다 최종 성토고가 높아지기 때문에 전단파괴 방지 차원에서 성토 법면에는 원래 계획대로 SCP를 1.6m 간격으로 설치하였다.

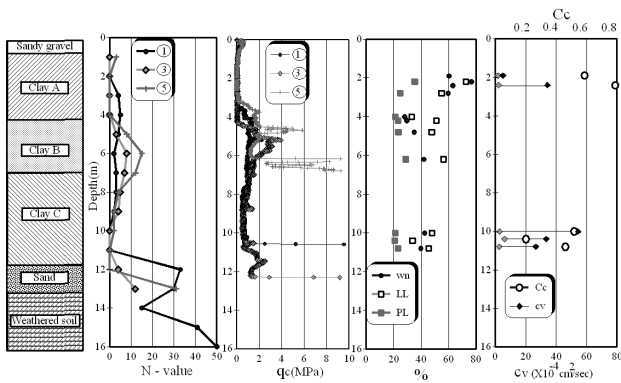


그림 2. 시험시공 지역의 주상도 및 지반 특성

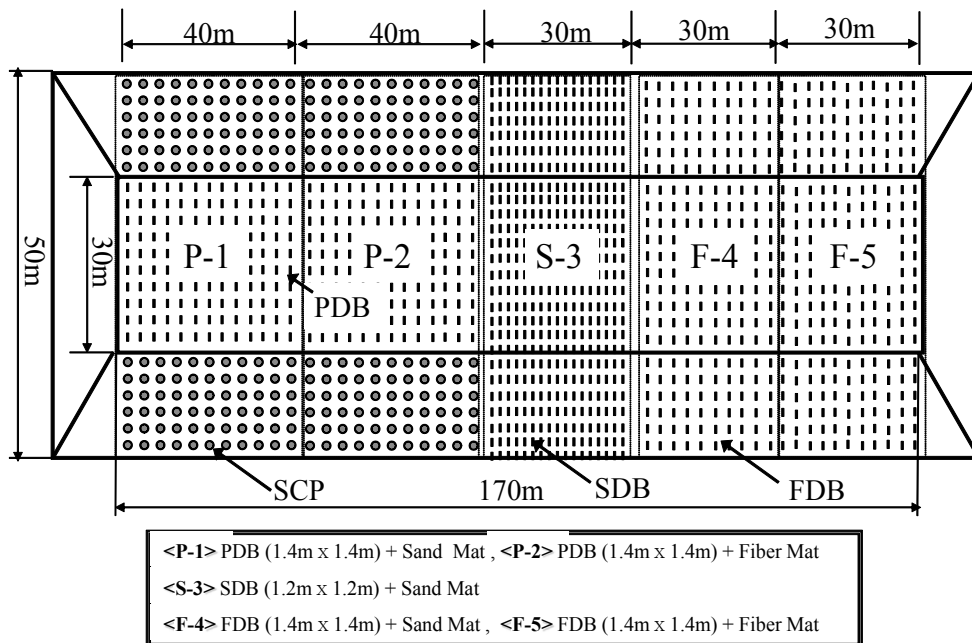


그림 3. 시험시공 계획 평면도

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 지표 침하

본 시험시공은 천연섬유배수재의 설치시 부터 계측을 시작하여 계측종료일까지 약 1,000여일에 걸쳐 시공 이력 및 지표침하량 등을 지속적으로 계측하였다. 계측 종료시 최종 성토고는 위치별로 6.0~6.6m이며, 성토부 중앙에서 측정된 지표면 침하량은 약 27~37cm정도 발생한 것으로 나타났다. 이 기간 동안 시간별 성토과정과 침하발생 양상은 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 보면 성토초기에는 모든 지역의 성토가 동일하게 진행되었으나 2006년 8월 29일 이후부터는 PDB가 설치된 P-1과 P-2지역의 성토고와 SDB 및 FDB가 설치된 S-3, F-4, F-5 최종성토고가 차이를 나타내고 있다. 최종적으로 PDB가 설치된 지역의 성토고는 6.6m로 SDB와 FDB가 설치된 지역의 성토고

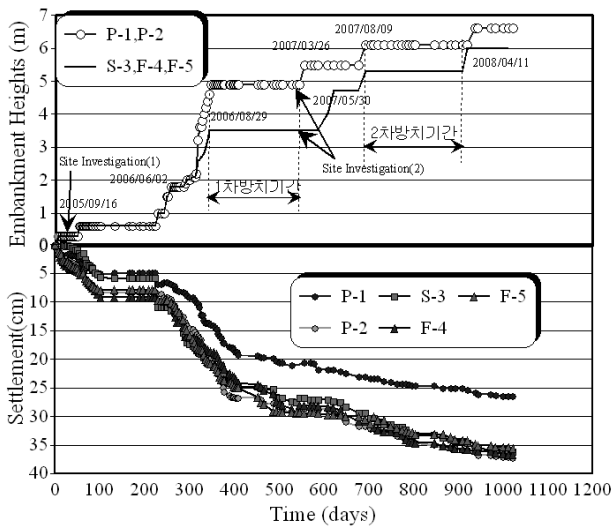
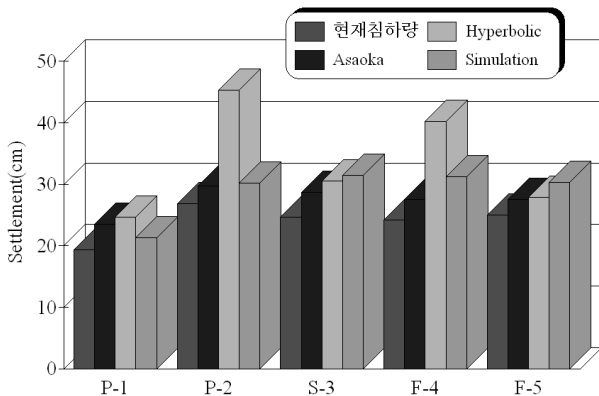


그림 4. 시험시공 지역의 성토이력과 지표면 침하 양상

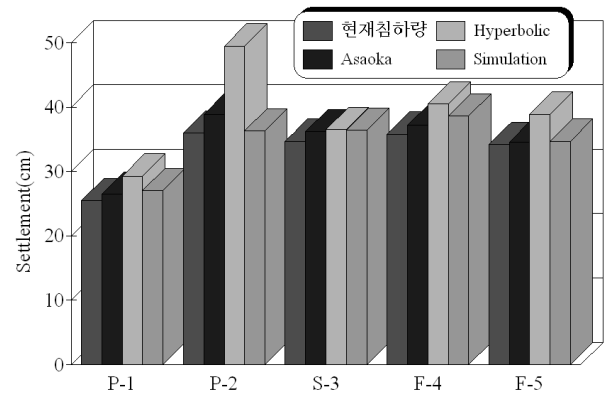


(a) 1차 방치기간에 대한 현재/예측침하량

6.0m보다 높게 시공되었다. 각 연직배수재가 설치된 지역의 압밀침하량 발생 양상을 보면 PDB가 설치된 P-1지역에서 측정된 압밀침하량을 제외하고는 모두 비슷한 양상의 침하가 발생하고 있는 것으로 나타났다.

시공 과정 중에서 가장 긴 방치기간에 해당하는 시공 시작 후 약 1년이 경과된 시점 그리고 시공 시작 후 2년이 경과된 시점을 각각 1, 2차 방치기간으로 설정하고, 이 기간 동안에 계측된 지표면 침하량을 이용하여 Asaoka방법 (1978), 쌍곡선방법 그리고 기존 이론식을 시행착오법으로 계측된 압밀침하곡선과 일치시키는 곡선적합모사법 (Simulation 법)(조성민, 1998)을 이용해 각 배수재 설치 지반에 대한 기간별 압밀도를 평가하였다. 곡선적합모사법에 사용한 이론식은 연직배수재 해석과 설계에 가장 널리 사용되고 있는 Barron(1948)의 해를 사용하였다. 그림 5는 1, 2차 방치기간 동안에 측정된 각 위치별 침하량과 각 위치별로 측정된 침하량을 이용하여 예측한 최종침하량을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보면 침하량 예측방법에 따라 그 결과가 다르게 나타나고 있다. 이미 여러 문헌을 통해 잘 알려졌다시피 본 시험시공에서 얻은 침하량 예측 결과에서도 쌍곡선법으로 예측한 침하량이 Asaoka법과 곡선적합모사법보다 다소 크게 나타났다. 그러나, 쌍곡선법을 제외한 Asaoka법과 곡선적합모사법으로 예측한 최종침하량은 PDB, SDB 그리고 FDB 등 설치된 배수재의 종류와 달리 거의 비슷한 최종침하량이 예측되어 시험시공 지역에서의 PDB, SDB 그리고 FDB의 현장 적용성은 거의 유사한 것으로 나타났다.

지표면 침하량을 이용하여 각 배수재의 성능을 좀 더 구체적으로 평가하기 위해 Asaoka법과 곡선적합모사법으로 유효압밀계수( $c_v$ )를 역산하고 그 결과를 그림 6에 나타



(b) 2차 방치기간에 대한 현재/예측침하량

그림 5. 각 위치별 현재침하량과 예측침하량

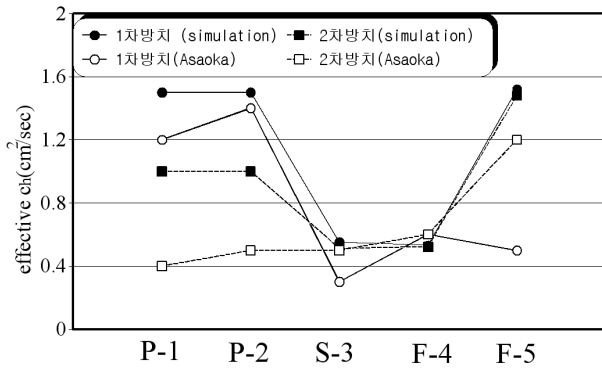


그림 6. 각 배수재 설치지점에서의 역산한 유효압밀계수 변화

내었다. Asaoka법을 이용해 역산한 유효압밀계수는 식 (1)을 이용하였으며, 곡선적합모사법으로 구한 유효압밀계수는 Barron(1948)의 횡방향압밀이론식을 근거로 역산하였다.

$$c_h = -\frac{d_c^2 \cdot F(n) \ln \beta_1}{8 \Delta t} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = r_e / r_w,$$

$r_w$  : 배수재 반경,

$r_e$  : 배수재의 유효반경,

$\beta_1$  : 회기직선의 기울기,

$\Delta t$  : 측정간격

여기에서 역산한 유효압밀계수는 배수재 설치시 발생하는 교란효과 등을 고려하지 않아 실제 지반의 압밀계수를 나타내는 것은 아니다. 그렇지만, 동일한 배수재 설치 장비를 사용하는 등 동일한 배수재 설치조건으로 시공하였기 때문에 배수재 설치로 인한 주변 지반의 교란효과는 동일하다고 간주할 수 있다. 따라서, 측정된 지표 침하량을 이용하여 역산한 유효압밀계수의 변화를 평가하면 각 배수재의 성능을 상대적으로 비교할 수 있다.

그림 6에서 보면 1차방치기간 동안에는 PDB가 설치된 P-1과 P-2 지역의 유효압밀계수가 SDB가 설치된 S-3와 FDB가 설치된 F-4 지역의 유효압밀계수보다 상대적으로 더 큰 것으로 평가되었다. 동일한 FDB가 설치된 F-5 지역의 침하량을 근거로 곡선적합모사법으로 역산한 유효압밀계수는 P-1과 P-2의 유효압밀계수와 비슷한 것으로 나타났으나, Asaoka방법으로 역산한 유효압밀계수는 S-3의 SDB나 F-4의 FDB 지역의 유효압밀계수와 비슷한 것으로 나타나 유효압밀계수 산정방법에 따라 다소 다른 결과를 나타내는 것으로 나타났다. 그러나 2년여가 경과된 2차 방

치기간 동안의 역산한 유효압밀계수 결과를 보면 PDB의 경우 유효압밀계수가 1차 방치기간에 평가된 유효압밀계수보다 감소하였으나 SDB를 설치한 S-3나 FDB를 설치한 F-4 지역에서 역산된 유효압밀계수는 1차 방치기간에 평가된 유효압밀계수와 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 또한, FDB를 설치한 F-5의 경우에는 곡선적합모사법으로 평가한 유효압밀계수가 1차 방치기간에서 얻어진 침하량으로 역산한 유효압밀계수보다 큰 것으로 나타났으며, Asaoka법으로 평가된 유효압밀계수는 F-5 지역의 FDB 설치지역만 증가하였고 이 외 지역의 유효압밀계수는 모두 유사한 것으로 나타났다.

시험시공 지역에서 측정한 지표침하량을 이용하여 유효압밀계수를 역산한 결과를 종합하면, PDB 설치 지역의 유효압밀계수는 시간이 경과할수록 감소하는 것으로 나타났다. 천연섬유배수재인 SDB와 FDB의 초기 유효압밀계수는 상대적으로 PDB보다는 작지만 초기 유효압밀계수와 일정시간 경과 후의 유효압밀계수가 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 현장시험 결과는 기존 PDB, SDB 그리고 FDB에 대한 Delft 공대식 통수능 시험과 복합통수능시험을 수행한 시험결과에서 천연섬유배수재인 SDB와 FDB가 PDB에 비해 상대적으로 초기 통수능은 떨어지지만 시간이 경과할수록 각 배수재의 통수능은 거의 유사하게 나타나 지표면 침하발생속도가 배수재의 종류에 상관없이 비슷하게 나타난다는 기존 연구결과(Kim et al., 2006)와도 일맥상통하는 결과를 보여주고 있다.

## 4.2 간극수압

현장시험시공에서는 성토 재하에 따라 지반 내부에서 발생하는 과잉간극수압 변화 뿐만 아니라 배수재 내부의 과잉간극수압 변화 양상을 살펴보기 위해서 지반용 및 연직배수재용 간극수압계를 설치하였다. 그림 7과 그림 8은 배수재 내부에 설치한 간극수압계와 지반 내에 설치한 간극수압계에서 측정한 과잉간극수압 변화를 각각 나타낸 것이다. 현장에서는 성토가 비교적 느리게 시공되었고, 간극수압 측정도 성토개시 후 800여일 경과된 2차 방치기간 도중에 시공과 관련된 문제로 측정을 중단하는 등 아쉬운 점이 있지만 한정적으로 수집된 간극수압 결과를 분석하여 시험시공 지역에 설치한 각 배수재들의 특성을 파악하였다.

그림 7과 그림 8 결과에서 공통적으로 나타나는 것은 벚짚배수재를 설치한 S-3 지역의 상부 지반과 배수재 상

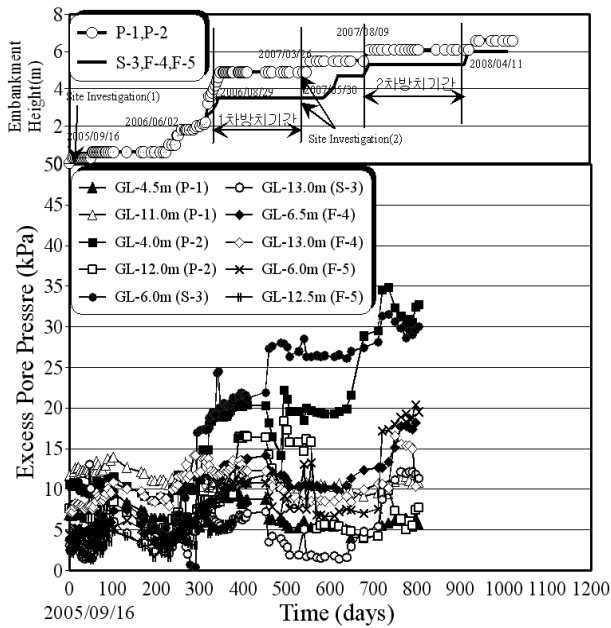


그림 7. 지반 내부의 과잉간극수압 변화

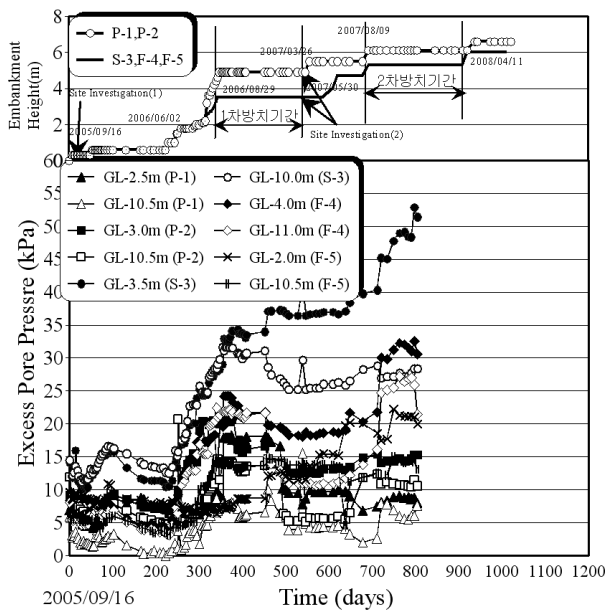


그림 8. 배수재 내부의 과잉간극수압 변화

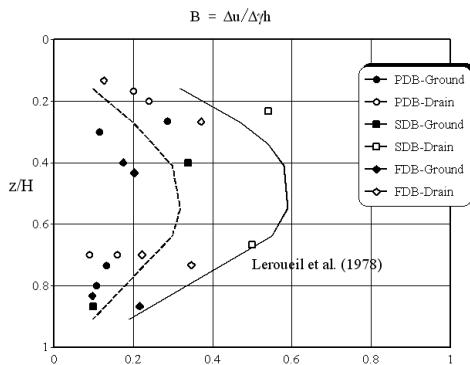


그림 9. 1차 성토시공이 종료된 시점의 깊이별 과잉간극수압 분포

단의 과잉간극수압이 다른 배수재 설치지반 또는 배수재 내부에서 측정된 과잉간극수압보다 크게 나타나고 있다는 것이다. 이를 좀 더 자세히 분석하기 위해 1차 성토시공이 종료된 시점, 1차 성토방치가 종료된 시점, 2차 성토시공이 종료된 시점 그리고 2차 성토 시공 종료 후 100여일 후에 측정된 지반 내부의 과잉간극수압과 배수재 내부의 과잉간극수압을 그림 9~그림 12와 같이 깊이별로 나타내었다. 여기에서 세로축에는 각 위치별로 과잉간극수압 측정심도(z)를 연약지반 두께(H)로 정규화 하였으며, 성토 하중( $\Delta\gamma h$ )에 따라 발생하는 과잉간극수압( $\Delta u$ )의 비를 간극수압계수 B로 나타내었다. 또한, 여기에서는 연직 배수재가 설치되지 않은 무처리 지반에서 얻어진 측정값들과 비교해 보기 위하여 Leroueil(1978)이 양면배수조건인 정규압밀점토 내부에서 발생하는 깊이별 평균 과잉간극수압 분포도도 함께 도시하였다.

그림 9~그림 12에서 나타난 과잉간극수압 분포를 분석하면 현장지반에서 측정된 과잉간극수압비 (B)는 연직 배수 공법이 적용되지 않은 무처리 지반 내부의 과잉간극수압 분포보다 대체로 작은 것으로 나타났다. 이는 연직배수재가 설치되어 횡방향 배수에 의한 배수 조건이 달라졌기 때문이다. 특히 앞서 지표침하량을 역산하여 다른 배수재 설치 지역보다 작은 유효압밀계수가 산정된 SDB 설치 지역의 경우에도 SDB 내부에서는 다소 통수저항이 커 배수재 내부에서 측정된 과잉간극수압이 PDB나 FDB에 비해 상대적으로 큰 과잉간극수압계수가 산정되었으나, SDB가 설치된 지반 내부에서 측정된 과잉간극수압은 Leroueil (1978)이 무처리 지반에서 측정된 깊이별 과잉간극수압 분포보다 작은 값을 가지고 있어 연직배수재에 의한 압밀이 진행되고 있음을 확인할 수 있었다.

각 시공 단계별로 살펴보면, 1차 성토시공이 종료된 직

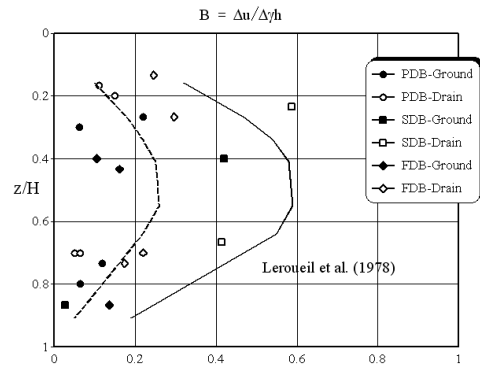


그림 10. 1차 성토방치가 종료된 시점의 깊이별 과잉간극수압 분포

후에 지반 내부에서 관측된 과잉간극수압 (그림 9)는 배수재 내부에서 관측된 과잉간극수압이 배수재의 종류와 상관없이 상대적으로 큰 것으로 나타났으며, 배수재 내부에서 측정된 과잉간극수압 중 상부에서 측정된 과잉간극수압이 지반 내부에서 측정된 과잉간극수압보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 성토재하로 인해 발생하는 과잉간극수의 흐름이 배수재로 집중되고 있음을 나타내며 이와 같은 경향은 그림 10에 나타난 1차 성토방치가 종료된 시점의 과잉간극수압 분포에서도 잘 나타나고 있다. 다만 앞서 지표침하량 분석시에도 벧짚으로 제작한 SDB 내부의 간극수압은 다른 배수재에 비해 상대적으로 높은 것으로 나타났는데, SDB 내부에서 측정된 간극수압을 제외하면, PDB와 천연소재로 제작한 FDB의 과잉간극수압 소산 양상은 비슷하며 방치기간 동안 압밀이 순조롭게 진행된 것으로 판단된다.

그림 11과 그림 12에서 나타난 2차 성토시공이 종료된 후와 2차 성토 시공 종료 후 100여일이 소요된 후의 과잉간극수압 분포에서도 그림 9와 그림 10에서 나타난 결과와 동일하게 지반내부에서 측정된 과잉간극수압보다 배수

재 내부에서 측정된 과잉간극수압이 상대적으로 더 크게 나타났다. 2차 성토시공시에 측정된 과잉간극수압 분포에서도 벧짚으로 제작된 SDB의 내부에서 측정된 과잉간극수압은 다른 배수재보다 상대적으로 큰 것으로 나타났지만, PDB와 천연섬유배수재 FDB의 과잉간극수압 분포는 배지반 내부나 배수재 내부에서 측정된 과잉간극수압 양상이 거의 유사한 것으로 나타났다. 그림 12는 2차 성토시공 종료 후 100여일 소요된 시점에서 측정된 과잉간극수압 분포인데 이 기간 동안 침하가 지속적으로 발생했음에도 불구하고 2차 성토시공 직후에 측정된 과잉간극수압 분포보다 오히려 약간 증가한 것은 매우 특이할 만한 사항이다.

### 4.3 현장지반조사

시험시공 지역에서는 시공을 시작하기 전과 1차 성토 후 압밀방치 종료시점에 지반조사를 실시하여 지반 개량 여부를 확인하였다. 지반조사방법으로는 표준관입시험(SPT)과 콘관입시험(CPT)을 연직배수재 시공 시작 전과 1차 성토 후 동일위치에서 수행하였다. 그림 13은 시험 시

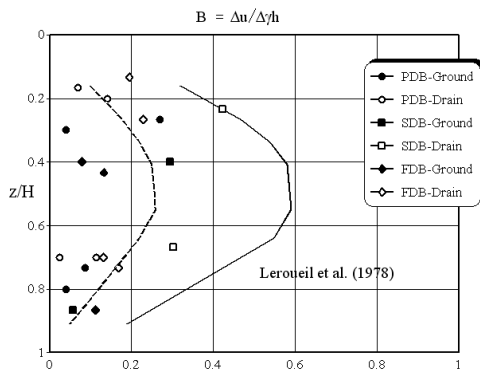


그림 11. 2차 성토시공이 종료된 시점의 깊이별 과잉간극수압 분포

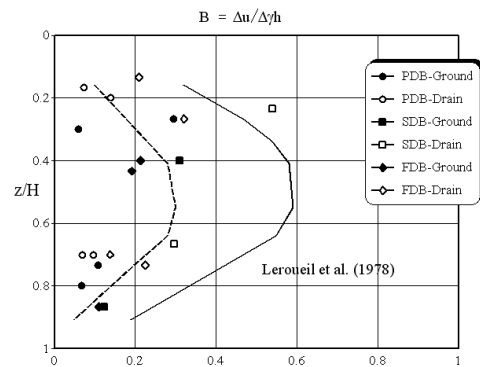


그림 12. 2차 성토 시공 종료 후 100여일 후의 깊이별 과잉간극수압 분포

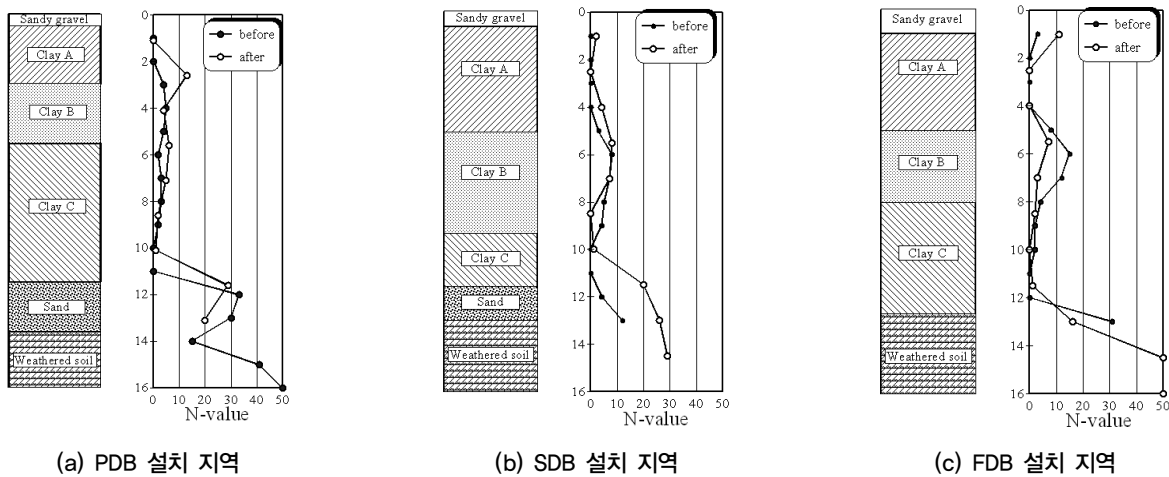


그림 13. 성토시공 전후의 표준관입시험 결과

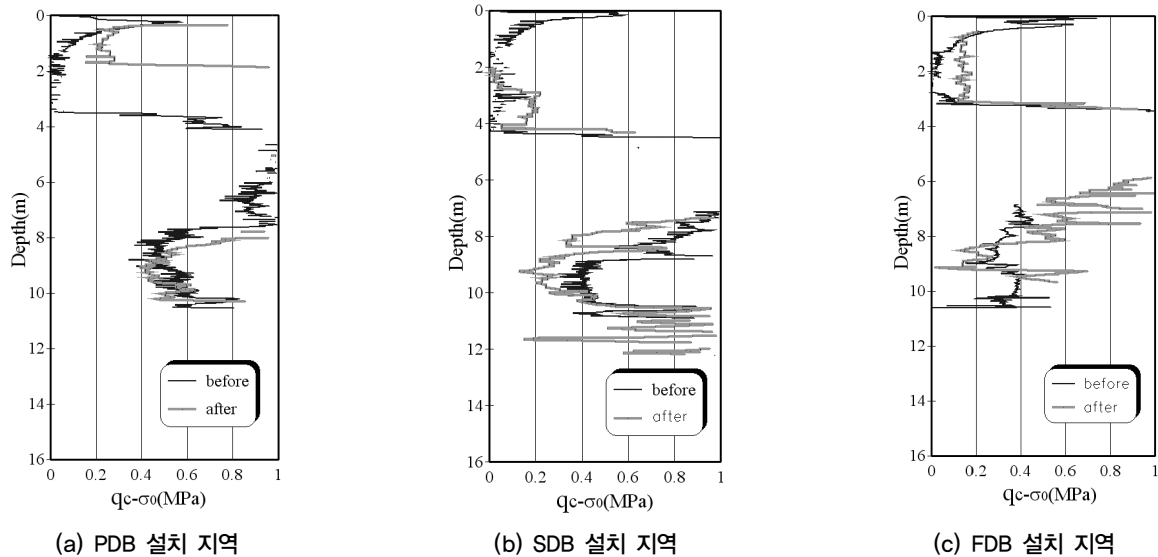


그림 14. 성토시공 전후의 콘관입시험 결과

공 지역에서 수행된 성토 전후의 표준관입시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 PDB와 SDB 설치 지역에서는 비록 표준관입시험 결과를 이용하여 연약지반의 개량 정도를 잘 나타내기는 어렵지만 성토재하 전후로 일정부분 지반 강도가 증가함을 간접적으로 판단할 수 있었다. 그러나 FDB가 설치된 지역에서는 표준관입시험 결과로는 선형재하 후의 지반 강도 증가 여부를 뚜렷이 판단할 수 없었다. 실제로 압밀침하에 의한 강도 개선 효과는 지반종류와 연약 정도에 따라 다르게 나타나기도 하지만, 특히 표준관입시험으로 지반강도 증가 현상을 판단하기는 다소 어려웠다.

그림 14는 성토시공 전후에 수행한 피에조콘관입시험(CPTU) 결과 중 심도별 콘관입저항력( $q_c$ )을 나타낸 것이다. PDB 지역은 4.9m 높이의 1차 성토가 시공된 시점에서 지반 조사가 실시되었으며, 천연섬유배수재 SDB와 FDB가 설치된 지역에서는 3.5m 높이의 1차 성토가 시공된 시점에서 지반조사가 실시되어 각 위치별 하중 조건이 다른 상태이므로 그림 14에서는 콘관입저항력에 상재하중( $\sigma_0$ )을 감하여 상재하중에 대한 영향인자를 제거하여 나타내었다. 또한, 한국도로공사에서 발간한 “도로설계요령”(한국도로공사, 2002)에서는 연약지반의 판단기준을 점성토 및 유기질토인 경우 콘관입저항력( $q_c$ )을 깊이에 따라 0.8~1.2MPa 이하의 값으로 정의하고 있는데, 그림 14에서는 연약지반에 대한 성토시공 전후의 콘관입저항력 증가 양상을 확인하기 위해 연약지반에 해당하는 부분만을 확대하여 나타내었다. 그림 14에서 보면 성토시공 전에는 거의 콘관입저항력이 측정되지 않을 정도로 낮은 콘관

입저항력이 측정되었으나, 1차 성토 방치 후에 측정된 상부 연약지반의 콘관입저항력은 배수재 설치 위치와 상관없이 모두 상당히 증가한 것으로 나타났다. 다만 하부 연약지반의 경우 PDB와 FDB 설치지역에서는 콘관입저항력이 약간 증가한 것으로 관측되었으나, SDB 설치지역에서는 콘관입저항력의 증가를 뚜렷이 관측할 수 없었다. 이 같은 CPTU 결과는 앞서 언급한 지표면 침하량 분석과 간극수압 분석 결과와 같이 PDB와 FDB의 연약지반 성능은 유사하지만 SDB는 이보다는 약간 떨어지는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

천연섬유배수재의 연약지반 현장 적용성을 분석하기 위해 플라스틱드레인보드(PDB), 벚짚배수재(SDB) 그리고 기존 천연섬유배수재(FDB)의 3종류의 연직배수재에 대한 시험시공을 수행하여 지표면 침하량, 간극수압 그리고 현장지반조사 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1. 플라스틱드레인보드(PDB)와 벚짚배수재(SDB) 그리고 기존 천연섬유배수재(FDB) 설치지역에서 장기간 측정된 지표면 침하량을 분석한 결과 1.4m 간격으로 설치한 PDB와 FDB의 거동은 유사하며 이보다 좁은 1.2m 간격으로 설치한 SDB 설치지역의 침하 경향도 PDB와 FDB 설치지역의 침하거동과 유사하게 나타났다.
2. 시험시공 지역에서 측정된 지표면 침하량을 이용하여 각 배수재 설치지역에 대한 유효압밀계수( $c_h$ )를 곡선적합모사법으로 역산한 결과 1, 2차 성토방치시 PDB는



1.0~1.5cm<sup>2</sup>/sec, FDB 0.52~1.52cm<sup>2</sup>/sec로 비슷하거나 작은 유효압밀계수가 산정되었으며, SDB의 경우에는 PDB나 FDB보다 좁은 배수재 설치간격에도 불구하고 유효압밀계수가 0.51~0.55cm<sup>2</sup>/sec로 나타났다.

3. 1, 2차 성토시공에 대한 과잉간극수압 양상을 분석한 결과 지반 내부에서 측정된 과잉간극수압은 연직배수재 내부에서 측정한 과잉간극수압보다 상대적으로 작은 것으로 나타나 과잉간극수가 연직배수재를 통해 소산이 되고 있음을 확인하였다. 또한 PDB와 FDB 설치 지역의 지반 내부와 배수재 내부에서의 과잉간극수압 발생/소산 양상은 유사한 것으로 나타났으나, SDB 지반 내부와 배수재 내부에서 측정된 과잉간극수압은 PDB와 FDB 설치 지역에서 측정된 과잉간극수압보다 다소 큰 것으로 나타났다.
4. 성토시공 전후의 피에조콘관압시험(CPTU) 결과를 분석한 결과 연직배수재 설치 종류와는 관계 없이 모두 상부 연약지반에서 콘관입저항력의 증가를 확인할 수 있었다.

이상과 같은 현장시험시공 결과를 바탕으로 판단하면 코코넛 코이어(coir)와 황마필터로 제작한 천연섬유배수재 (FDB)는 국내외에서 많이 사용되고 있는 플라스틱 소재의 배수재(PDB)와 거의 유사한 성능을 가지는 것으로 평가되었다. 특히 코코넛과 황마는 천연소재이기 때문에 일정기간이 소요되면 흙으로 동화되는 친환경재료이므로 친환경성이 강조되는 지반개량 현장에서는 연약지반 개량

공법으로 그 활용도 매우 높을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설기반구축사업 (03기반기술-A15의) 일환으로 수행되었으며, 시험시공을 지원해주신 국토해양부, 익산 지방국토관리청 그리고 한라건설 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 조성민 (1998), *국내 연약점성토 지반의 성토 재하시 변형 특성 분석*, 박사학위 논문, 서울대학교, pp.162.
2. 한국건설기술연구원 (2007), *자연친화형 도로건설을 위한 친환경 배수재 활용 연약지반 개량기술 연구*, 건설기반구축사업 최종보고서, 건설교통부, pp.398.
3. 한국도로공사 (2002), *도로공사 설계요령*, 제 2권-5편 토공 및 배수.
4. Asaoka, A (1978). "Observational Procedure of Settlement Prediction", *Soils and Foundations*, Vol.18, No.3, pp.87-101.
5. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", *Transactions*, ASCE, Vol.113, No.2346, pp.718-754.
6. Leroueil, S., Tavenas, F., Trak, B., La Rochelle, P. & Roy, M. (1978), "Construction Pore Pressures in Clay Foundations under Embankments, Part I : the Saint-Alban test fills", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15(1), pp.54-65.
7. Kim, J. H., Cho, S. D. and Kim, S. S. (2006), "Evaluation of the Environmentally-Friendly Drains for Soft Ground Improvements", *Proceedings of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, ISOPE-2006, pp.546-551.

(논문접수일 2008. 11. 13, 심사완료일 2008. 12. 2)