

## 연약지반에서 수평배수재의 활용성에 관한 연구 Applicability of Prefabricated Horizontal Drain for Improvement Method of Soft Ground

장용채<sup>1)</sup>, Yong Chai Chang, 김홍종<sup>2)</sup>, Hong Jong Kim, 정중홍<sup>3)</sup>, Jong Hong Jung

<sup>1)</sup>정회원, 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 책임연구원, Chief Researcher, Korea Highway Research Center, Korea Highway Corporation

<sup>2)</sup>한국도로공사 도로연구소 지반연구실 책임연구원, Chief Researcher, Korea Highway Research Center, Korea Highway Corporation

<sup>3)</sup>한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원, Researcher, Korea Highway Research Center, Korea Highway Corporation

**SYNOPSIS** : Sandmats are used to dissipate trapped water rapidly from the embankment built on soft ground. At present, however, it becomes difficult to obtain qualified sands since natural resources such as river sand are to be exhausted.

In this study, lateral drainage capacities of prefabricated horizontal drains which were installed in highway construction site are investigated in order to find possible substitution for river sands as drainage materials. On the basis of measurement data at the construction site, it was concluded that use of the prefabricated horizontal drains shows satisfactory drainage capacity and is also determined to be economical.

**KEYWORD** : Prefabricated Horizontal Drain, Soft ground

### 1. 서론

연약지반 처리에서, 지반중의 압밀수를 신속히 체체 밖으로 배출하기 위해 샌드매트(sand mat)를 설치하게 되는데, 천연재료의 고갈과 함께 양질의 모래를 구득하기 어려울 뿐만 아니라 원거리로부터의 수송으로 인한 경제적 손실과, 산모래를 이용하는 경우 투수성의 급격한 감소를 가져오는 등의 문제가 있었다. 본 연구에서는 샌드매트 대체재로서 수평배수재(prefabricated horizontal drain)의 적용성을 검토하기 위해 기성제품을 고속도로 현장에 시험시공하고 횡방향 배수능력과 적용성을 검토하였다.

토목섬유를 이용한 연약지반의 개량은 주로 연직배수재에 제한되어 있으며 수평배수재를 이용한 연약지반의 처리공의 사례는 국내에는 전무하며 일본의 경우 그 예가 있으나 미미한 정도이다. 따라서 본 연구에서는 수평배수재의 배수능력을 확인하여 적용성을 검증하고 이후 국내 활용을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

### 2. 수평배수재

토목섬유 수평배수재는 연약지반수의 원활한 배수를 위하여 토목섬유제품인 코어(경질폴리염화비닐 또는 기타 유사재료)와 이를 조합한 필터(폴리에스터장섬유부직포 등)로 이루어진 배수재이다. 그 단면

치수는 두께가 5m/m ~ 25m/m이며, 폭 30cm~100cm로서 코어의 형상과 크기 및 부직포와의 결합방식에 따라 다양하다.

수평배수재 주변의 지반수는 필터를 통하여 배수재 내부로 유입되고, 코어의 배수부를 통과하여 수평배수재의 단부로부터 집수관이나 성토외부로 배출된다. 수평배수재는 큰 상재하중을 받아도 통수단면이 감소가 미미하며, 또 배수재 내부는 토립자에 의한 눈막힘(Clogging)이 생기지 않기 때문에 지반수를 원활히 배수하게 된다. 이와같은 특성을 활용하여 공사현장에서 점차적으로 구하기가 어려워지고 있는 양질의 모래나 쇄석 등 천연골재인 모래를 이용한 매트 대체용으로 사용할 수 있다. 다음의 표 1은 본 연구에서 사용된 수평배수재의 제원과 투수특성 및 역학특성을 정리한 것이다.

표 1 본 연구에서 사용된 수평배수재의 제원 및 역학적 성질

특 성	특 성 치
<b>코어부</b>	
재질	PVC
파단시 신장율(%)	50
압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )	5.0
인장강도(kg/width)	300
<b>부직포(필터)부</b>	
재질	Polyester
두께, mm	10
인장강도, kN/m	190이상(160이상*)
파단시 신장율, %	20이상(20이상*)
투수계수, cm/s	
연직방향	$1.0 \times 10^1$
수평방향	$1.0 \times 10^{-2}$

단, \*는 습윤시의 값

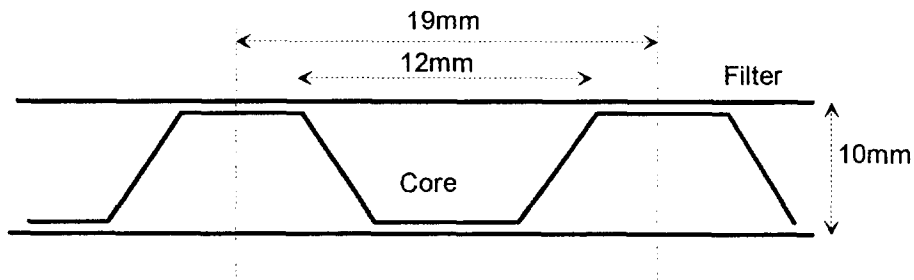


그림 1 본 연구에 사용된 수평배수재의 단면과 제원

한편, 수평배수재는 일정한 규격품을 공장생산하기 때문에 현장에서 별도의 품질관리가 필요 없으며 운반 및 시공이 용이하고, 시공단가가 모래의 60~70% 정도이기 때문에 시공성과 경제성에서 매우 우수한 재료이다.

### 3. 시험시공

#### 3.1 개요

본 연구는 국내에서 처음으로 토목섬유 수평배수재의 적용성을 검토하기 위하여 서해안 고속도로 A 공구 전단파괴구간의 압성토 구간을 선정하여 토목섬유 수평배수재를 시공하였다. 본 구간의 압성토는 2단으로 설계되어 있으며 상단은 6m, 하단은 2.5m로 상단의 연약지반은 sand compaction pile로 처리하고 하단의 연약지반은 무처리 지반으로 되어 있다. 수평배수재는 하단의 하부 무처리구간에 시공하였다. 표 2는 시험시공구간의 현장조건을 정리한 것이다.

표 2 토목섬유 수평배수재 시험시공 구간의 현장조건

구 간	위 치	연약지반 처리공	계획성토고(m)	연약층심도(m)	배수조건	배수재설치 간격
서해안고속도로 A공구	STA. 2+156~2+231	무처리	2.5m	4.0~6.0	양면배수	1.2m

#### 3.2 시험시공 구간의 지반조건

본 구간은 4~6m의 연약층이 형성되어 있으며 자연함수비가 매우 높은 지반이며 2~11 정도의 N치를 보인다. 약간의 모래층(sand seam)이 협재하고 있으나 배수층의 역할을 할 수 있는지는 불명확하다. 표 3은 시험시공구간의 지반 물성치를 정리한 것이다.

표 3 시험시공구간 지반 물성치

시 공 구 간	전 단 특 성		압 밀 특 성		비 고
	구 분	설 계 값	구 분	설 계 값	
서해안고속도로 A공구	습윤단위중량 $\gamma_i(t/m^3)$	1.535	초기간극비 $e_0$	1.633	
	수중단위중량 $\gamma_{sub}(t/m^3)$	0.535	압축지수 $C_c$	0.53	
	점착력 C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.08	압밀계수 $C_v(cm^2/sec)$	$1.0 \times 10^{-3}$	
	내부마찰각 $\phi(^{\circ})$	0.5			

### 3.3 계측기 매설현황

시험시공한 수평배수재의 배수능력을 확인하기 위해 시험시공구간에, 6분의 침하판과 1분의 경사재, 3분의 간극수압계를 매설하고 1회/10일의 주기로 계측을 실시하였다. 다음의 그림 2는 계측기 매설현황과 시험시공구간의 단면도 및 평면도를 나타낸 것이다.

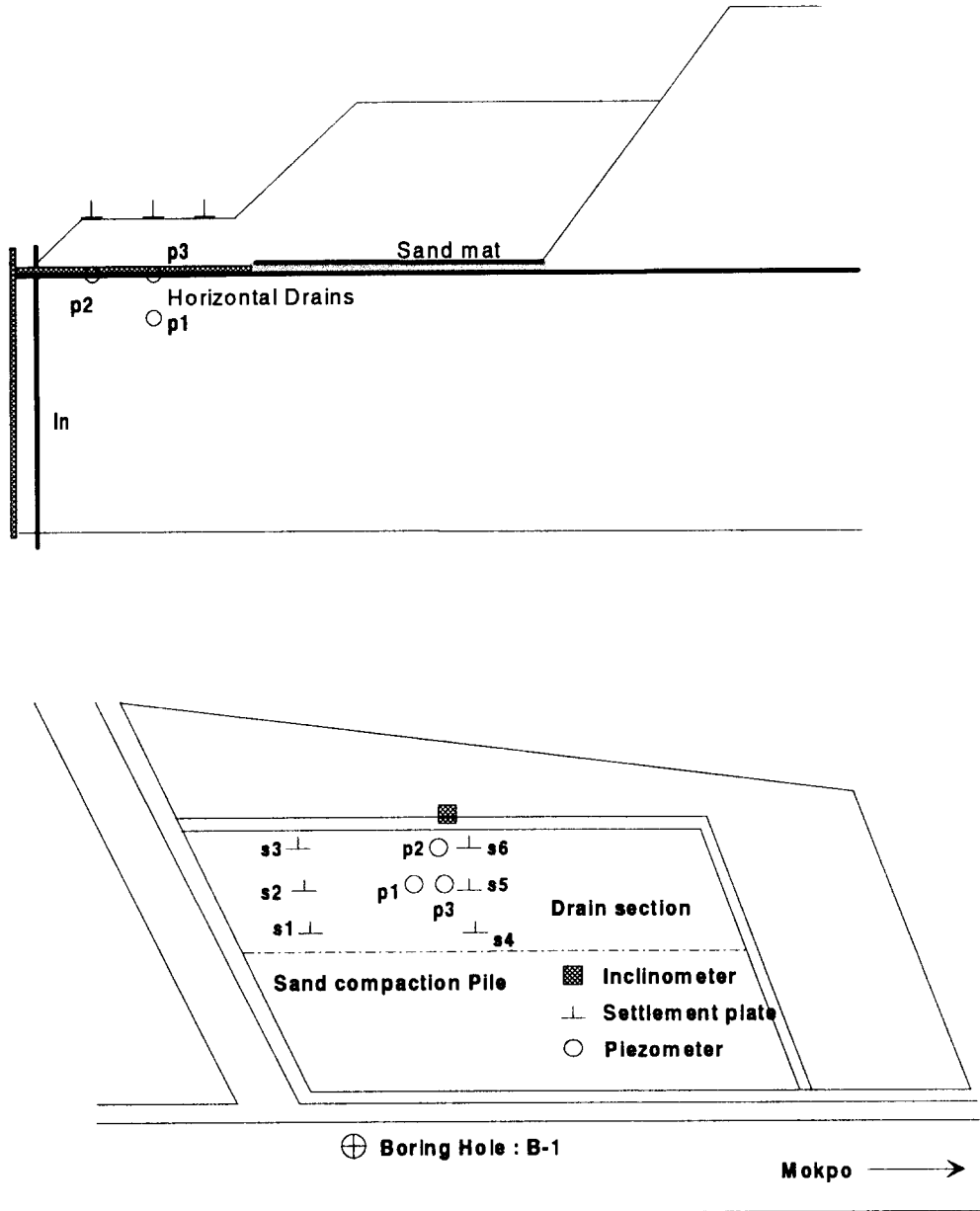


그림 2 수평배수재 시험시공구간의 계측기 매설현황

### 3.4 수평배수재 배수능력 및 설치간격 검토

본 연구에서는 수평배수재의 배수능력을 검토하기 위해 샌드매트의 투수계수를 입경  $D_{20}$ 에 해당하는 투수계수의 평균값인  $k = 2.5 \times 10^{-2}$  cm/s, 수평배수재는  $k = 1.0 \times 10^1$  cm/s로 보고 성토연장 10m에 대해 각각의 배수능력을 검토하였다<sup>1), 6)</sup>.

수평배수재 및 샌드매트의 배수재의 배수량은 Darcy의 법칙에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

여기서,  $k$ 는 수평배수재의 투수계수,  $i$ 는 동수경사,  $A$ 는 수평배수재의 통수단면적이다.

위의 식으로부터 샌드매트 50cm의 배수능력은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Q_s &= k \cdot i \cdot A \\ &= 2.5 \times 10^{-2} \text{cm/s} \times i \times 1000 \text{cm} \times 50 \text{cm} \\ &= 1,250 i \text{ cm}^3/\text{s} \end{aligned} \quad (2)$$

한편, 본 구간에 시공한 수평배수재의 1분당 배수능력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_p &= 1.0 \times 10^1 \text{cm/s} \times i \times 30 \text{cm} \times 0.8 \text{cm} \\ &= 240 i \text{ cm}^3/\text{s} \end{aligned} \quad (3)$$

각각의 배수능력에 의거하여 샌드매트 50cm의 배수능력과 동등한 수준의 배수능력을 확보하기 위한 수평배수재의 설치간격은, 성토연장 10m당 수평배수재 소요개수 = (샌드매트의 배수량)/(수평배수재 1분당 배수량)으로 계산할 수 있다.

$$\frac{Q_s}{Q_p} = \frac{1,250i}{240i} \approx 6 \text{ EA} \quad (4)$$

따라서, 샌드매트 50cm와 동등한 배수능력을 확보할 수 있는 수평배수재의 설치간격은 1.7m으로 계산할 수 있으나 이 검토는 단지 투수계수만을 고려한 것이므로 확실한 배수능력을 확보하기 위해 1.2m로 설치하였다.

## 4. 계측결과

### 4.1 침하판

그림 3은 본 구간에 설치된 침하판 중 중앙부(S2, S5)에서 계측된 결과이다. 그림에서 실선은 당초 설계 침하곡선을 나타내며 점선으로 표시한 1차 수정 설계침하곡선은 쌍곡선법에 의한 장기침하량 추정 결과로부터 압밀도 40%에서 압밀정수를 수정하여 도시한 것이다. 성토후 180일을 전후로해서 압밀이 완료되었다가 다시 추가적인 압밀이 진행되고 있는 것을 볼 수있는데 이것은 지하수위가 약 2~3m('97. 10월 현재)정도 하강하여 이에 따른 추가적인 유효응력의 증가로 인한 것으로 판단된다. 지하수위의 하강은, 본선구간에 약 4개월 동안 계속되고 있는 4분의 Well Point의 펌핑에 의한 것으로 판단된다. 지하

수의 하강에 따른 추가적인 침하량은 약 7cm 정도로 계산할 수 있으며 현재 모든 구간에서 7~8cm 정도의 추가적인 침하가 발생하였으며 점차 수렴하고 있다.

## 4.2 간극수압계

그림 4와 그림 5는 간극수압계측결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 수평배수재 설치부분의 간극수압(P2, P3)의 소산이 원활히 이루어지고 있으며 그림 4에서 원으로 표시한 부분은, 성토하중에 의한 지반의 과잉간극수압 증가로 발생한 지반수가 수평배수재에 의해 배출된 것으로 추정되는 부분이다. 현재 수평배수재를 통한 배수는 대부분 완료된 상태며, 이것은 압밀이 끝나고 있다는 것으로 이해할 수 있다. 그림 5는 재하 후 침두수두와 200일 후의 수두를 나타낸 것인데, 간극수압 P1의 경우 초기 침두수두의 약 35%, P2, P3에서는 85~90% 가 소산된 것을 알 수 있다.

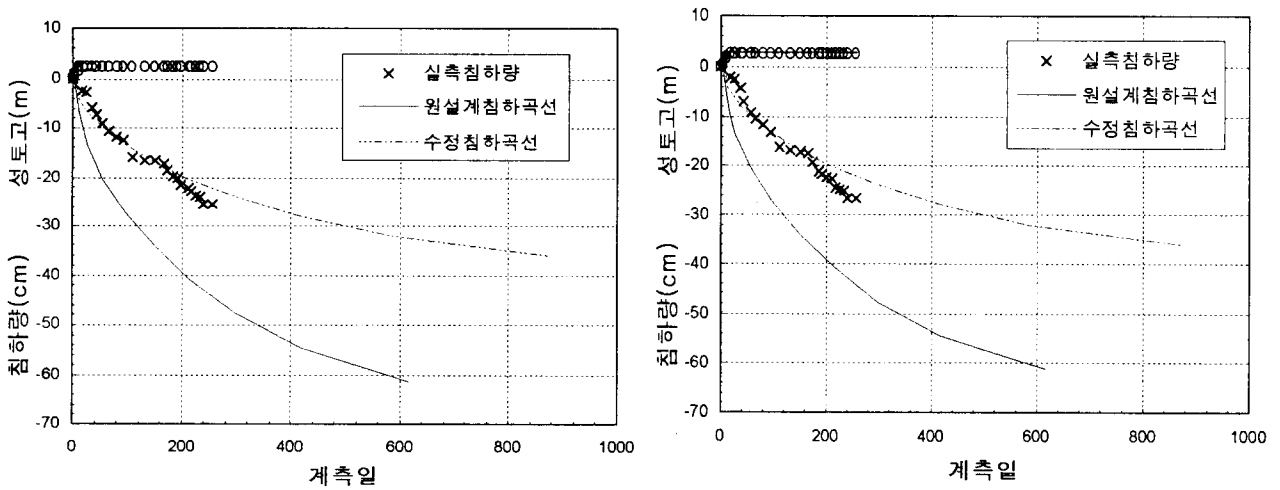


그림 3 침하 계측결과(중앙부 지점 S2와 지점 S5)

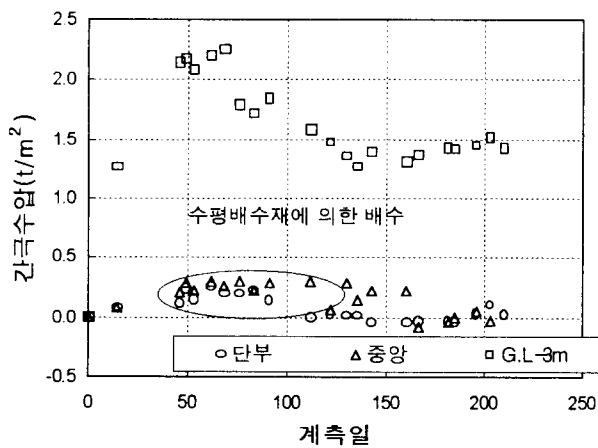


그림 4 간극수압 계측결과

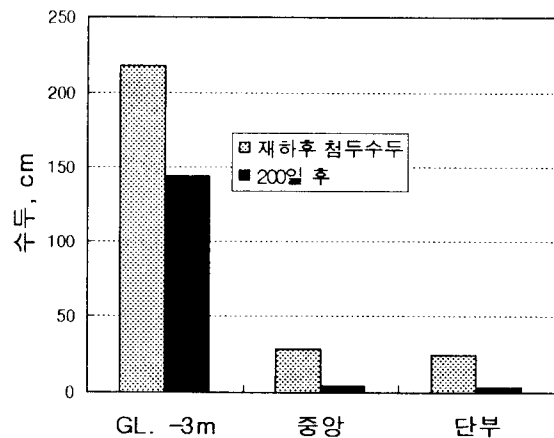


그림 5 지점별 수두변화

### 4.3 경사계

그림 6과 그림 7은 본 구간의 수평변위를 계측한 결과이다. 그림에서 보듯이 성토가 완료된 직후에 약 70%에 달하는 변위가 발생하였다. 이는 초기성토를 위한 압버력 덤핑에 의한 소성유동으로 판단되며 이후의 수평변위는 극히 미미하여 성토체의 안정에는 문제가 없는 것으로 판단되고, 현재까지 총 수평 변위는 약 230mm이다.

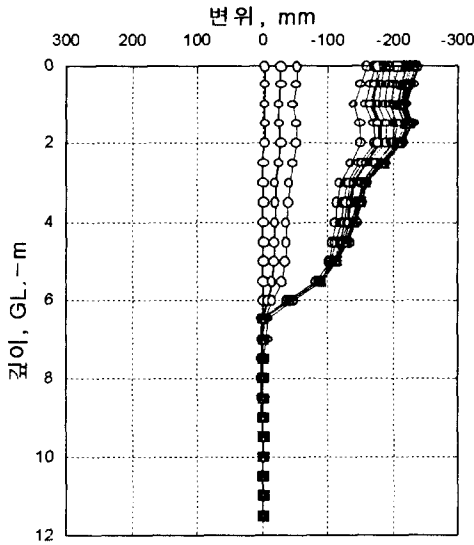


그림 6 경사계 계측결과

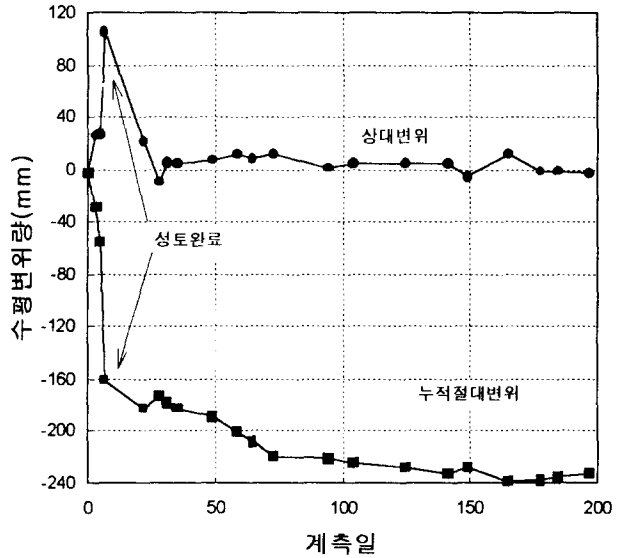


그림 7 수평변위 변화양상

### 5. 결론

고갈되어 가는 천연재료인 모래를 대체할 목적으로 연약지반 처리공법중에서 수평배수재로서 토목섬유 수평배수재를 시험시공하여 배수능력과 현장 활용성을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 토목섬유 수평배수재는 품질관리가 용이하며 시공성 및 경제성이 우수한 인공재료로서 지반과의 역학적 거동이 검증되면 향후 샌드매트를 대체할 수 있는 좋은 재료인 것으로 판단된다.
2. 시험시공구간에서, 지중 및 표면에서의 간극수압은 35~90%가 감소하여 시험시공한 배수재에서 원활한 배수가 일어나고 있는 것으로 판단된다.
3. 침하계측자료에 의하면 본 시험시공구간에서 정상적인 침하가 일어나고 있는 것을 알 수 있고, 경사계 계측결과에서도 초기에 발생한 소성적 유동 이후에는 추가적인 급격한 수평변위는 관측되지 않아 토목섬유 수평배수재를 활용한 본 시험시공구간의 안정성에 문제가 없는 것으로 판단된다.
4. 상기의 결과로 볼 때, 수평배수재는 상재하중에도 불구하고 단면의 축소나 구멍막힘현상이 없이 배수재로서의 역할을 충분히 하고 있는 것으로 판단되며 이후 연약지반상 도로성토의 수평배수재로서의 활용 뿐만아니라 각종 구조물의 배수공으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌

1. 장용채, 김홍중, 1996, “연약지반 수평배수재 연구(I)”, 도로연구소, 한국도로공사
2. 서해안고속도로(무안-목포)간 건설공사 지반조사보고서, 1994, 한국도로공사
3. 이상호, 1992, “Geotextile의 평면투수 성능 분석”, 한국지반공학회지, 8권 3호, pp.61~73
4. NHI, 1989, “Geotextile Engineering Manual”, Federal Highway Administration, U.S Department of Transportation
5. Yoshikuni H., H. Nakanodo, 1975, “ Consolidation of Clay Cylinder with External Radial Drainage”, Soils and Foundation, Vol. 15, No. 1, p17~
6. 재단법인토목연구센터, 1990, “수평배수재 퍼블릭드레인”, 토목계재료기술·기술조사증명서