

## 연약지반처리를 위한 플라스틱 배수공법 연구

### A Field Study on Plastic Board Drain Method for Soft Ground Improvement

김성환, Sung-hwan Kim\* 노한성, Han-sung Roh\*\* 김홍중, Hong-jong Kim\*\*\*

\* 한국도로공사 도로연구소 지반연구실장, Research Director, Geotechnical Engineering Division, HRC, KHC

\*\* 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, Chief Researcher, Geotechnical Engineering Division, HRC, KHC

\*\*\* 한국도로공사 도로연구소 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Division, HRC, KHC

SYNOPSIS : In this study, we studied the applicability of the Plastic Board Drain(PBD) method to solve problems caused by the method using sand material. A site test was carried out to investigate the feasibility of this method. We reviewed design procedure, performed laboratory and field tests, installed instruments, and analyzed factors which caused problems. As a results of the site test, it was observed that this method showed high rate of installation and a good performance. Therefore, it was found that PBD method was a useful treatment method for the soft foundation.

#### 1. 서론

최근 우리나라는 국토의 균형있는 발전을 위하여 서 남해안 지역의 고속도로 공사를 활발히 진행하고 있다. 전국 반나절 생활권 조성을 목표로 향후 9 X 7 전국도로망 구축을 위하여 신설 고속도로의 건설이 추진되고 있다. 이와같은 도로망 구축시 많은 지역에서 연약지반상에 고속도로 건설이 불가피하며 이들 지역의 지반개량을 위한 안정처리공법은 연직배수 공법이 폭 넓게 사용되고 있다.

연직배수공법은 수평방향의 암밀배수거리를 단축시켜 암밀을 촉진시키고, 지반강도 증진을 도모하는 공법으로 지금까지 샌드드레인, 샌드팩드레인을 주로 사용하여 왔다. 이들 공법은 고속도로 건설시 많은 적용실적이 있고 그 효용성 또한 잘 알려져 있으나 천연자원의 고갈에 따른 경제성 저하 및 우수 자재의 공급이 어려운 실정이다. 또한 연직배수공법중 국내에 널리 알려진 페이퍼 드레인은 사용 재료의 성능과 내구성 및 나타입과 같은 시공방법으로 최근까지는 기대이상의 효과를 보지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 페이퍼 드레인의 재료 특성과 시공법을 개선한 플라스틱 드레인공법(PBD)에 대하여 현장시험시공, 현장계측관리 및 지반거동분석을 통하여 본공법에 대한 연약지반처리의 효율성과 국내 고속도로 시공시 적절한 기준 및 시공법을 제시코자 한다.

#### 2. 시험시공

##### 2.1 개요

본 연구에서는 플라스틱배수공법의 현장적용성을 검토하기 위하여 서해안고속도로 서천-군산간 고속도로 현장에 시험시공을 실시하였다. 시험시공현장은 4차선 고속도로 건설구간으로 그 현황은 표 2.1과 같다.

표 2.1 플라스틱배수공법의 현장적용성 검토를 위한 시험시공현황

위 치	연 장	계획 성토고	연약지반 심도	PDB 설치 심도	설치간격	설치수량
서해안 고속도로 서천-군산간 제 3-1공구 STA. 6+040구간	STA. 5+960~6+160 (L=200m)	9.80~13.30	6.5m	평균: 7.51m 최대:11.73m	일반성토구간 : 1.3 X 1.3m 구조물 구간 : 1.1 X 1.1m	2,247공 22,419m
서해안 고속도로 서천-군산간 제 3-2공구 STA. 3+900구간	STA. 3+820~4+050 (L=230m)	6.86~ 9.51	10.0m	평균: 9.98m 최대:16.60m	일반성토구간 : 2.3 X 2.3m 구조물 구간 : 1.9 X 1.9m	7,070공 59,643m

플라스틱 배수공법의 현장적용성을 검토하기 위하여 표 2.1에 기술한 구간중 제 3-1공구 STA 6+040구간에 대해 중점적으로 계측기를 매설하여 검토하였다. 수평·수직 변위량, 층별 침하량 및 간극수압 등을 계측하기 위하여 6종류의 계측기를 매설하였으며(표 2.2), 그 매설단면은 그림 2.1과 같다.

표 2.2 플라스틱배수공법의 현장적용성 검토를 위한 계측기 매설현황

종 류	간극수압계	지하수위계	층별침하계	경사계	프로파일게이지	지표침하판
설치목적	○ 성토에 의한 간극수압거동 파악	○ 지하수위 변동 파악	○ 지반의 층별 침하량 측정	○ 성토지반의 수평변위 측정	○ 지반의 연직 침하량 측정	○ 지반 침하량 측정
형식 및 규격	○ 형식 : 전기식 ○ 범위 : 2kg/cm <sup>2</sup>	○ 형식 : 카사그랜드식	○ 형식 : 마그네틱식 ○ 범위 : 2m	○ 형식 : 2축형 ○ 범위 : 심도의 20%	○ 형식 : 전기식 ○ 범위 : 3m	○ 형식 : 침하봉
수 량	3개소 11측점	1개소	1개소 4측점	1개소	1개소	1개소 3측점

## 2.2 플라스틱 배수재의 품질 특성

플라스틱 배수재의 품질특성은 연약지반의 압밀축진공법 적용시 가장 중요한 검토 사항중의 하나이다. 그러나 국내의 경우 한국공업 표준규격에는 배수재의 중량, 폭, 두께등 기본적인 사항만을 규정하고 있고 배수기능확보를 위한 기준이 없어 현재까지 국내 고속도로 연약지반처리시 충분한 효과를 보지 못하여 왔다. 따라서 본 연구에서는 선진외국에서 규정하고 있는 플라스틱 배수재의 품질규정을 검토하고, 연약지반상에 매설시 배수재가 최대한 배수효과를 발휘할 수 있도록 배수재의 기준을 검토하였다.

플라스틱 배수재의 품질특성은 배수재의 물리적 특성 및 화학적 특성으로 나누어 검토할 수 있다. 이중에 물리적 특성은 강도에 관련한 기준과 배수능력에 대한 향으로 생각할 수 있다. 국내 기준의 경우 강도에 대한 기준은 있으나 아직 배수능력에 대한 기준이 없는 상태로 본 연구에서는 기존 국내·외 연구결과를 이용하여 플라스틱 배수재의 배수능력에 대한 기준을 포함시키고자 한다. 또한 향후 국내 연약지반 특성에 따른 플라스틱 배수재의 배수능력에 대한 정량적인 성과기준이 필요하다.

본 연구의 시험시공에 사용한 플라스틱 배수재의 품질 특성은 표 2.3과 같다.

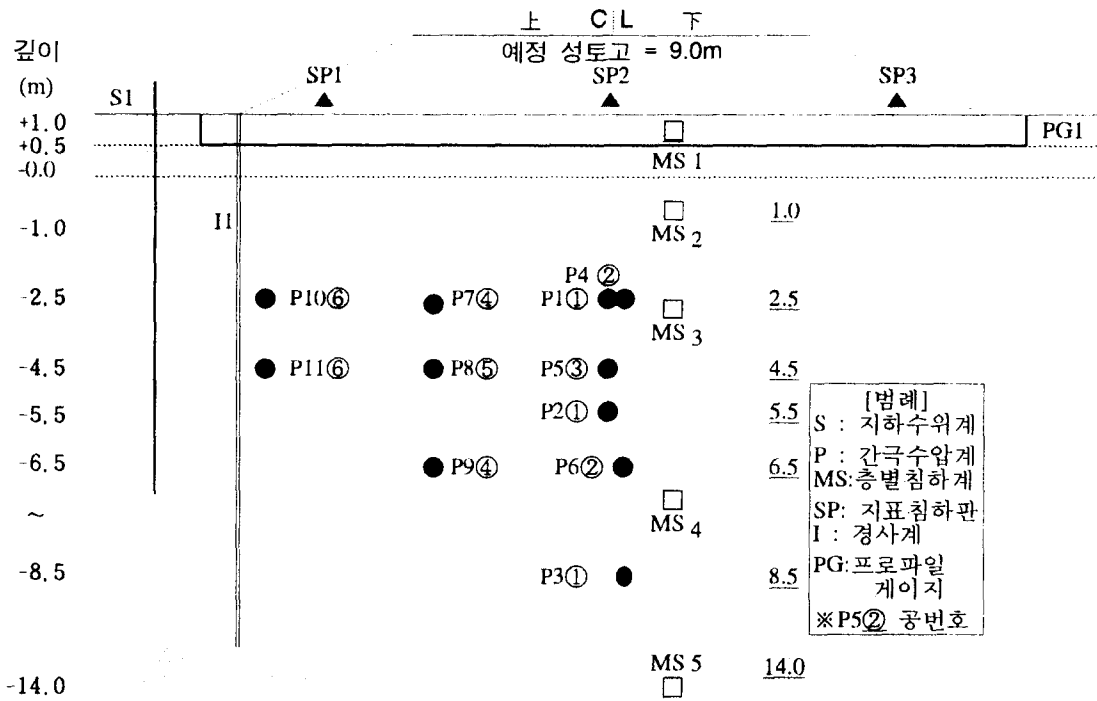


그림 2.1 플라스틱 배수공법 적용성 검토를 위한 시험시공구간의 계측기 매설 단면도

표 2.3 플라스틱 배수재의 품질 특성

항 목		플라스틱 배수재	시험방법
재 질		폴리프로필렌	KSK 0210
표준중량(g/m)		80.0	KSK 0515
치수(m/m)	폭	100.0 ± 5.0	실 측
	두께	4.0 ± 0.5	
코아의 끝단면 (m/m)	폭	3.0 ± 0.5	
	깊이	1.5 ± 0.2	
	공수	56.0 ± 2	
1m당 횡단면적 (1m <sup>2</sup> )		0.168	실 측
배수용량 (m <sup>2</sup> /y, 20ton/m <sup>2</sup> )		1.700	
인장강도(kg/전폭)		300.0 이상	KSK 0520
내약품성	황산 30% 수용액	3% 이하	일반시험법 (상은 5시간 침지 후 중 량감소율)
	염산 20% 수용액	"	
	NaOH 40% 수용액	"	
	NaCl 10% 수용액	"	
	증류수	"	
필터 (부직포)	투수계수(cm/sec)	1 X 10 <sup>-3</sup> 이상	KSF 2322
	중량(g/m)	140	KSK 0514
	인장강도(kg)	70	KSK 0520
	인장신도(%)	30 - 80	KSK 0520
	파열강도(kg/cm <sup>2</sup> )	12	KSK 0351
	인열강도(kg)	25	KSK 0537
	유효구멍크기 (AOS) O <sub>90</sub> (μm)	70 - 80	BS 6906/2
	사용 부직포	Typer 4457	Du Pont

### 2.3 플라스틱배수재의 타입방법

플라스틱 배수재의 품질 특성과 함께 시공방법에 따라 연약지반처리 효과는 상당히 큰 차이를 보이고 있는 것으로 판단된다. 국내 고속도로 시공시 나타입과 같은 시공방법으로 시공한 결과 충분한 효과를 보지 못한 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 플라스틱 배수재의 시공시에 필터의 손상과 지반조건을 적절히 고려한 시공방법에 대하여 검토하여 보았다.

플라스틱 배수재의 효율적인 타입방법으로는 연약지반상에 배수재 타입기계의 주행성, 타입력, Smear Zone의 최소화를 기할 수 있는 정적인 타입방식이 좋다. 또한 케이싱 단면적이 적고, 케이싱 내부에 이토 침투로 인한 배수재의 딸러올림 현상인 공상현상(Rebound)을 방지하고, 경비 절감을 도모할 수 있는 시공기계 장치의 호환성, 고장율과 소모성 등을 고려하여 타입방법을 결정할 필요가 있다. 일반적인 항타식과 유압식의 시공방법에 대한 장단점을 비교하면 다음 표 2.4와 같다.

표 2.4 플라스틱 배수재의 시공방법 일반

지반 및 시공조건	고려사항	항 타 식	유 압 식
지중 장애물(지중 전석층 또는 쇄사) 존재시	시공기계의 타입력 및 수직유지도	타입력이 크고, 케이싱의 강성이 유압식의 5배 이상이므로 수직유지도가 양호	케이싱의 강도가 비교적 적고 지중장애물 접촉시 휨 가능성 존재
시공성과 주행성 양호	지반교란, 시공능률	유압식에 비해 지반교란이 크고, 시공능률이 떨어진다.	케이싱의 단면적이 작아 지반교란이 적고 시공능률이 좋다.
표토층의 허용지지력이 극히 작아 시공장비의 진입 곤란시	시공기계의 접지압, 표토의 보강	보강판을 사용 접지압 감소 (약 0.2 kg/cm <sup>2</sup> )	굴삭기등 경장비 사용, 트랙의 폭을 넓혀 접지압 감소 (약 0.4 kg/cm <sup>2</sup> )
지중에 과잉압밀상태의 이토층 존재	시공중 케이싱내부로 이토진입	케이싱 밀림효과로 시공상 유리	케이싱 가이드에의 이토로 인한 장애 발생 가능
장비의 운용성	장비 1대당 구성요소	많다	적다
공 사 비	운영경비	유압식대비 고가	저가

### 3. 시험시공의 결과분석 및 고찰

플라스틱 배수공법의 현장적용성 검토를 위한 시험시공의 결과는 플라스틱 배수재 설치시 지반의 교란정도를 정성적으로 판단하기 위해 배수재 타입에 따른 지반의 간극수압 증가양상과 성토에 따른 지반의 간극수압을 파악하였다. 또한 성토에 따른 지반 및 성토체의 안정성 분석을 통하여 본 공법의 효용성을 확인 하고자 하였다.

#### 3.1 간극수압 계측결과

플라스틱 배수재의 설치에 따른 간극수압 증가양상을 파악하기 위하여 배수재를 설치하기 전에 간극수압계를 매설하여 시공시에 간극수압을 측정하였다. 간극수압 측정과정은 그림 3.1에 나타난 것과 같이 간극수압계 매설지점을 중심으로 외부매설지점(그림 3.1의 1)~12)번)를 타입한 직후 1회 측정하고, 또 5분 후에 측정하였다. 또한 내부지점(그림 3.1의

13)~16)번)을 타입한 직후, 5분 경과 후, 10분 경과 후 간극수압을 측정하였다. 간극수압 측정결과 그림 3.2에 나타난 것과 같이 매설지점으로부터 2.9m 떨어진 지점에 타입한 후의 간극수압은 심도가 깊은 경우 1.44ton/m<sup>2</sup> 증가하였고, 매설지점에서 0.6m 떨어진 지점에 타입한 후의 간극수압 증가는 4.21ton/m<sup>2</sup>로 나타났다. 이와같은 간극수압증가는 앵커플레이트(크기=80mm X 150mm)의 압입으로 인한 지반의 압축현상 때문인 것으로 생각된다. 배수재 타입 후 이로 인해 발생된 지반의 간극수압 증가는 깊이에 따라 차이를 보이고 있으나 평균 2ton/m<sup>2</sup>정도 증가함을 알 수 있다. 배수재 타입으로 발생된 간극수압의 소산속도는 성토시점을 결정하는데 있어서 중요한 사항이 될 수 있다. 이것은 배수재 설치로 발생된 간극수압이 소산되기전 성토는 지반에 과대한 간극수압의 발생을 일으킬 수 있으므로 지반의 안정화를 유지시키기 어렵기 때문이다. 본 시험시공 구간에 있어서 배수재 타입으로 발생된 간극수압은 타입 후 9일동안 거의 소산이 됨을 알 수 있었다.

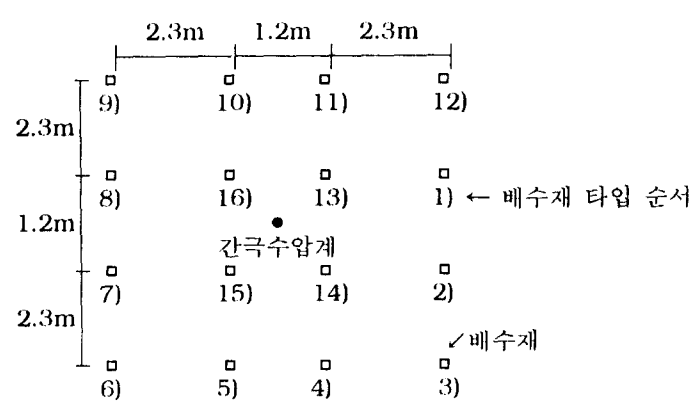


그림 3.1 간극수압 측정을 위한 배수재 설치과정

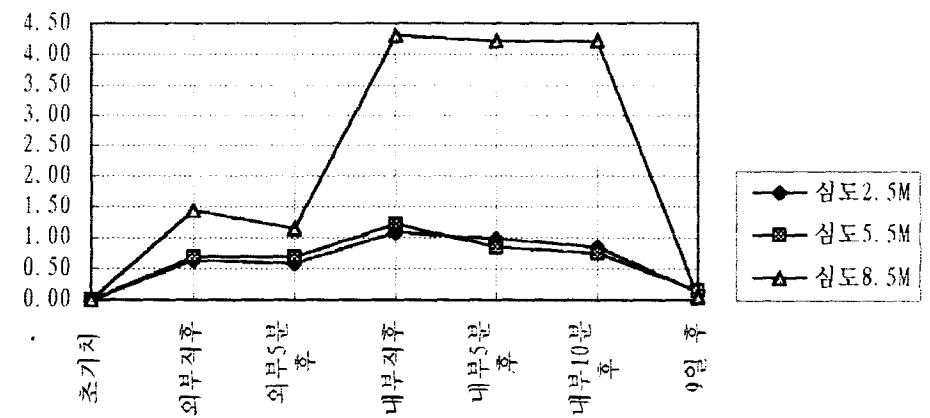


그림 3.2 플라스틱 배수재 설치에 의한 지반의 간극수압 증가

또한 성토에 따른 간극수압의 증가는 그림 3.3과 같다. 성토에 따라 간극수압은 증가하는 경향을 보이고 있으나 하중증가량에 비하여 상당히 적은 증가량을 보이고 있다. 이는 시험시공을 위한 지반조사 결과 본 구간이 다소 과압밀지반의 특성을 보이고 있었던 점과 성토시공시 성토속도 3.0cm/day, 1회 최대성토높이를 30cm로 제한, 1단계성토 4.3m를 성

토하는 기간이 140일정도 소요되어 성토기간중에도 간극수압의 소산이 이루어진 것으로 판단된다.

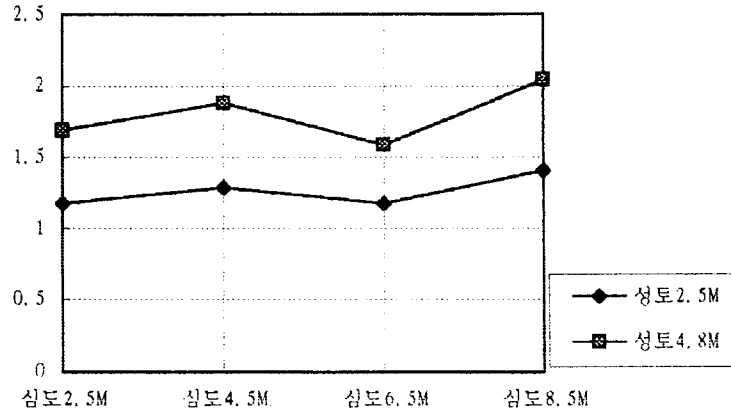


그림 3.3 시험시공구간의 성토에 따른 간극수압 증가량

### 3.2 현장계측관리를 통한 안정성 검토

본 시공구간의 안정성 분석은 1단계 성토에 따른 지반의 거동(수직침하 및 수평변위)을 계측한 자료를 이용하여 검토하였으며, 그 결과는 그림 3.4와 같다. 본 시험시공구간에 대한 안정성 분석은 松尾, 川村(Matsuo, Kawamura)<sup>(5)</sup>이 제안한 방법을 사용하였다. 이 방법은 연약지반의 성토시 수평변위량과 압밀침하량의 경과시간에 따른 변화를 관측하여  $S_v$ 와  $S_h/S_v$  좌표축상에 나타내면, 파괴된 성토는 어느 일정 기준선( $c/q_f$ )에 접근한다는 사실을 이용하여 현장에서 계측자료를 이용하여 안정성을 판단할 수 있는 방법이다. 이 방법의 근본적 원리는 일정한 시간에 수평변위량이 압밀침하량보다 크게 되면 성토체체는 불안정 상태로 된다는 것을 의미하는 것으로 본 시험시공구간에서는  $S_v-S_h/S_v$  안정관리 방법을 이용하여 성토층의 안정성을 검토하였다. 검토결과 시험시공구간은  $S_h/S_v \geq 0.6$  과  $S_h \geq 0.1$ 일때  $c/q_f \geq 0.95$  범위의 안정측에 속한다.

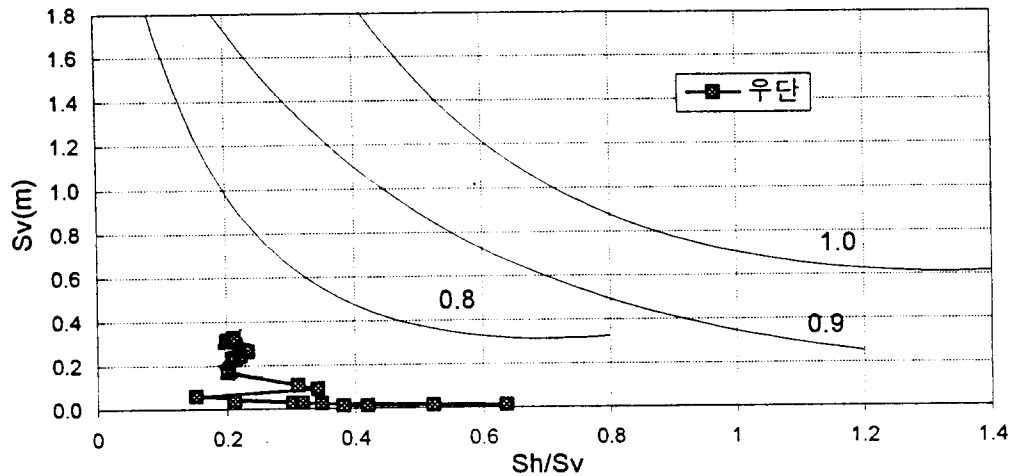


그림 3.4 현장계측관리 구간의  $S_h-S_h/S_v$  안정관리도

그림 3.3, 3.4에 나타난 것과 같이 시험시공 구간간의 간극수압 거동 및 안정성 평가 결과 단계성토고에 대한 플라스틱 배수공법의 현장적용성은 상당히 양호한 것으로 나타났다.

### 3.3 플라스틱 배수공법 적용시 고려사항

#### 3.3.1 플라스틱 배수재의 선정기준

##### 가. 배수재의 외관 및 일반 사항

- 1) 배수재는 여과 접촉면적이 커서 배수성이 우수한 것으로 선정해야 한다(배수재의 형상은 Core와 Filter재의 구성 방법에 따라 접착식과 포켓식으로 구분한다. 접착식의 경우 열융착 방법에 따라 투수성 및 장기 안정성의 감소가 우려되므로 적용시는 이에대한 검토가 필요하다. 또한 코아의 형상은 배수재 자체의 통수면적(Core와 Filter사이의 부착면적)을 확보하기 위해 일반적으로 +형의 사용을 원칙으로 한다).
- 2) 배수재의 플라스틱 코아는 토압에 대한 변형이 없고, 압밀 침하에 대한 순응성이 양호하여 질곡시 배수로의 절단과 막힘이 없어야 한다. 일반적인 배수재의 배수용량에 대한 제안 값은 다음 표 3.1과 같고, 토질특성에 적합한 필터의 간극크기(Apparent Opening Size:AOS)는 일반 점토의 경우( $O_{90} < 160 \mu\text{m}$ )와 해성점성토( $O_{90} < 80 \mu\text{m}$ )로 나누어 고려해야 한다.

표 3.1 일반적인 배수재 용량 기준

구 분	길이 10m이하이고, 안정문제가 없을 때	길이 10m이상 또는 안정문제가 있을 때
직선 관로	$Q_w > 1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$	$Q_w > 5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$
원 관로	$Q_w > 7.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$	$Q_w > 3.25 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{sec}$

- 3) 필터재는 압밀간극수의 배수에 충분한 투수계수를 갖으며 배수재 내부로 미세 토립자의 혼입(clogging)을 방지하며 산, 알카리, 박테리아에 대한 저항성이 커야 한다.

##### 나. 규격 및 품질기준(일반)

##### 1) 배수재의 규격

표 3.2 배수재의 규격

항 목	단 위	규 격
중 량	g/m	80 이상
폭×두께	mm	$(100 \pm 5.0) \times (4 \pm 0.5)$
골단면표준	mm	폭: $(3.0 \pm 0.5)$ ×깊이: $(1.5 \pm 0.2)$ ×공수: $(56 \pm 3)$
1m당 여과면적	$\text{m}^3$	0.15 이상

2) 품질기준

플라스틱 배수재의 품질기준은 앞에서도 언급한 바와 같이 물리적 기준과 화학적 기준으로 나누어 검토 할 수 있다.

표 3.3 플라스틱 배수재의 물리적 특성 기준

구 분	항 목	단 위	기 준 사 항	시 험 방 법
Drain재(core+Filter)	인장강도(건조)	kg/폭	220 이상	KS K 0520
	인장강도(습윤)	kg/폭	220 이상	KS K 0520
	투수계수	cm/sec	$\alpha \times 10^{-3}$ ( $\alpha$ :1~9)이상	KS F 2322
	배수성능	$\text{cm}^2/\text{sec}$ (a) 1ton/m <sup>2</sup>	180 이상	ASTM D 4716
$\text{cm}^2/\text{sec}$ (a) 30ton/m <sup>2</sup>		140 이상		
Filter재 (부직포)	투수계수	cm/sec	$\alpha \times 10^{-3}$ ( $\alpha$ :1~9)이상	KS F 2322
	인장강도	Kg	50 이상	KS K 0520 (GRAB법)
	인장신도	%	20 - 120	
	인열강도	Kg	10 이상	KS K 0537
	파열강도	Kg/cm <sup>2</sup>	10 이상	KS K 0351
	유효구멍크기 (AOS) 0 <sub>90</sub>	$\mu\text{m}$	$\leq 80$	BS 6906

표 3.4 플라스틱 배수재의 화학적 특성 기준

구 분	항 목	단 위	기 준	시 험 방 법
Drain 재 및 Filter 재	황산 : 30% 수용액	%	3 이하	일 반 시 험 법 상온에서 5시간 침지 후 중량 감소율
	염산 : 20% 수용액	%	3 이하	
	NaOH : 40% 수용액	%	3 이하	
	NaCl : 10% 수용액	%	3 이하	
	증류수	%	3 이하	

다. 플라스틱 배수공법 시공시 고려사항

- 1) PBD 시공시 필터의 손상을 방지하기 위하여 유압식 방식의 타입기로 시공하여야 하며, 케이싱 선단은 지반교란을 최소화할 수 있는 가능한한 소단면의 폐단면 앵커를 사용해야 한다.
- 2) 샌드매트 포설시 원지반이 교란되는 것을 방지하여야 하므로 중차량에 의한 급속 작업을 하지 않아야 하며, 샌드매트 포설 방법에 대해서도 주의를 기울여야 한다.
- 3) PBD는 압밀층의 최하단부까지 설치해야 하며, 상부절단 길이는 샌드매트 표면에서 15cm이상으로 한다.
- 4) 사용중 잔여길이를 연결시 포켓식으로 하여야 하며, 포켓식 연결이 불가능할 경우 잔여길이는 버리도록 한다.



5) PBD 시공상태를 확인할 수 있도록 시공 전에 타입 위치도를 작성하고 변조가 불가능한 타입자동기록기를 장치하여 구역별, 번호별로 타입일시, 타입깊이, 타입량을 기록지에 기록한다.

상기사항과 PBD 시공시 필터의 손상과 지반 조건을 적절히 고려한 타입방식으로 시공하여야 한다. 특히 나타입에 의한 시공방법은 드레인재의 손상을 가져오므로 사용해서는 안될 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 천연자료의 사용에 따른 자원고갈 및 경제성 저하에 따른 대체공법이라 할 수 있는 PBD공법에 대하여 고속도로 연약지반에의 적용성을 현장시험시공을 중심으로 검토하였다. 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 플라스틱 배수공법(PBD)공법에 대한 국내·외 연구결과를 이용 PBD의 설계와 시공에 대한 재기준에 대한 접근방법을 고찰하였다.
2. 고속도로 연약지반 개량공법으로써 플라스틱 배수공법을 적용한 구간에 일일 성토량 3cm/day로 단계성토 4.3m 성토시의 간극수압 및 성토제체의 안정성 검토 결과 안정한 것으로 판단된다.
3. 플라스틱 배수공법을 적용한 지반상에 성토가 장기간에 걸쳐 이루어 질 경우 성토기간중에도 압밀효과가 크므로 성토기간을 방치기간에 합산하여 고려할 수 있는 설계법이 추천된다.
4. PBD공법의 국내 적용성 검토를 위하여 서천-군산간 고속도로 건설구간중 2개소(3-1공구 STA. 6+040, 3-2공구 STA. 3+860)에 시험시공을 실시하여 본 공법의 시공성 및 시공에 따른 지반거동을 현장계측을 통하여 분석한 결과 기존 모래를 이용한 샌드드레인 공법의 대체공법으로서 충분한 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Jamiolkowski, M., Lancellotta, R.(1983). "Precompression and Speeding Up Consolidation", Proc. VIII ECSMFE, Helsinki.
2. J.J. Rixner, S.R. Kraemer and A.D. Smith.(1986) "Prefabricated Vertical Drains", Vol. 1, Federal Highway Administration.
3. Ladd, C.C.(1986) "Stability Evaluation During Staged Construction", Terzaghi Lecture, ASCE Boston Convention, October 1986.
4. W.F.J. de Jager and J.P. Oostveen, "Systematic Quality Control of Vertical Drainage", 4th International Conference on Geosynthetics, The Hague 1990.
5. 松尾・川村.(1978). "軟弱地盤上の盛土施工に關する施工管理圖", 土と基礎, Vol.27, No.7.

6. 김상규.(1995). “밴드 드레인의 품질과 연약지반 개량효과와의 관련”, '95년도 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회.
7. 박영목.(1995). “플라스틱 드레인재의 배수성능에 관한 연구”, '95년도 토목섬유 학술발표회 논문집, 국제토목섬유학회 한국지부.
8. 동신기술개발.(1995). “서해안 고속도로(당진-군산간) 제3공구 연직배수공법 시험시공에 대한 기술검토서”.
9. 정경환.(1996). “연약지반의 성토와 굴착공사에 있어서 현장계측에 의한 안정성 분석”, 박사학위논문, 부산대학교 대학원.
10. 한국도로공사 도로연구소.(1995). “1995년도 실용화 연구보고서”.