

국내 PBD재의 배수성능과 진공효과에 의한 통수능력 향상에 관한 연구

A Study on Drainage Performance of Domestic Plastic
Board Drains and Recovery of Discharge Capacity by Vacuum Effect

박 영 목*
Park, Yeong - Mog

Abstract

Laboratory testings were carried out on plastic board drains(PBDs) using large scale test apparatus to evaluate the physical properties and the drainage performance. The test results reveal that the domestic products of PBDs are well compared with the foreign products as far as the quality and drainage performance are concerned. It has also been confirmed that the discharge capacity decreases with time in such a way that the air bubbles are entrapped inside kinky PBDs and these air bubbles block the water flow through PBDs. It has been found that the vacuum pressure is effectively applicable to recover the discharge capacity affected by the entrapped air bubbles.

요 지

연약지반 개량공법으로 국내에서 생산된 플라스틱 보드 드레인(PBD)이 많이 사용되고 있으나 이들에 대한 물리적 성질 및 배수성능의 검증이 미약한 실정이다. 또한 PBD의 웰 레지스턴스(well resistance)에 크게 영향을 미치는 공기(기포)의 영향에 대한 인식이 부족하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 대형 실험장치를 이용하여 먼저 국산 PBD를 중심으로 물리적 성질 및 배수성능 시험을 실시하여 제품의 질적 수준을 규명하고 대표적인 국외제품과 비교했다. 아울러 PBD재의 꺾임 부분에 누적된 공기(기포)가 통수능력에 지장을 초래하는 것을 재확인하였으며 현장에서 적용할 수 있는 진공펌프를 이용하여 공기(기포)를 제거시키므로써 통수능력의 회복이 가능하다는 것을 나타냈다.

Keywords : Plastic board drain(PBD), Drainage performance, Air(bubble), Discharge capacity, Vacuum pump, Soft ground improvement, Vertical drain method.

* 정회원, 영남대학교 공과대학 토목공학과 조교수

1. 서론

연직배수(Vertical drain)공법에 의한 연약지반 개량에 있어서 종래에 많이 이용되어 온 샌드 드레인공법의 대용으로 경제성, 시공성 및 품질관리 측면에서 유리한 플라스틱 보드 드레인(Plastic-board drain, PBD; 일반적으로 국내에서는 Paper drain으로 부르고 있음) 재를 이용하는 케이스가 증가되고 있다(박영목, 1994). PBD공법은 1937년에 Kjellman에 의해 판상으로 된 마분지(Card board drain)가 개발된 것이 시초이며, 1948년에 Barron과 Kjellman이 각각 설계 계산식을 발표했다. PBD재의 유용성이 주목되어진 것은 1960년경이며(嘉門, 1985), 지금까지 전세계적으로 약 50여종의 PBD재가 개발되어 있다(Holtz 등, 1991).

국내에 PBD재를 이용한 연약지반공법이 최초로 적용된 것은 1975년 창원외곽의 적현단지이고(김수삼, 1994), 그 후에 대불공단, 서천~군산간 고속도로(김성환 등, 1996)를 비롯한 서·남해안의 연약지반 개량공법으로 많이 이용되고 있다. 최근에는 시공기계의 발달과 함께 해상시공도 이루어지고 있으며(佐佐木, 1985), 타설심도도 점차적으로 증가하여 약 40m 깊이까지 타설하여 성공적으로 지반개량을 수행한 예도 있다(Hansbo, 1992). 아울러 PBD재의 배수성능에 관한 연구도 많이 수행되어 왔다.

지금까지의 PBD재의 배수성능에 관한 주요 연구를 구체적으로 열거하면, PBD재의 변형 및 축압에 의한 종방향 통수능력의 저하를 확인한 연구(Kremer 등, 1983; Hansbo, 1986; Holtz 등, 1989; Oostveen, 1990; Ali, 1991; Pradhan 등, 1991; 三浦 등, 1993; 朴·三浦, 1994; 김상규, 1995), 판상의 PBD재의 등가직경(Hansbo, 1979; Rixner 등, 1986; Tanaka, 1990; Kamon 등, 1991), PBD의 필터재의 투수계수(嘉門, 1985; 박영목, 1985), PBD주위의 세립토의 이동현상(Rankilor, 1981; Vreeken, 1983; 박영목, 1985; Dierickx, 1986; 三浦

등, 1993), 웰 레지스틴스에 관한 근사해석(Yoshikuni & Nakanodo, 1974; Hansbo, 1979; Cheung & Lee, 1991; Hird 등, 1992; Bergado & Long, 1994) 및 엄밀해석(Onoue, 1988), PBD재의 굴곡 및 꺾임 예측(Ali, 1991; Madhav 등, 1995), 스미어 존에 관한 연구(Hansbo, 1979; 尾上, 1991; Bergado 등, 1991; Madhav 등, 1993) 등과 같다.

일반적으로 PBD재에 기본적으로 요구되는 사항으로는 타설시 손상이 발생하지 않아야 하며, 타설심도에 상응한 축압과 압밀진행에 따른 꺾임 및 굴곡 등이 발생하여도 PBD재 자체의 통수능력을 유지해야 하고, 세립토 등의 이동특성에 의한 악영향에 대해서도 필터 슬리브(filter sleeve)의 투수계수가 유지되어야 하는 것이다. 또한 지반의 압밀도 증진에 따라 간극수의 동수구배가 낮아지는 특성과 압밀이 진행됨에 따라 PBD재의 꺾임부근에 지반내에 용존되어 있는 공기(기포)가 누적되어 통수능력 저하에 끼치는 영향도 고려해야 한다(朴, 1994). 상기 사항들을 충족하면서 PBD재가 원활한 배수기능을 수행하여 연약지반에 소요의 압밀촉진 효과를 달성할 수 있어야 할 것이다.

국내에서는 현재 16개의 회사에서 PBD를 공급하고 있으며, 이들 중 일부는 배수성능이 확인된 외국제품을 수입 판매하고 있는 반면 그 외는 국내에서 직접 생산 공급하고 있다. 국내에서 생산되는 PBD제품에 대한 배수성능시험에 관한 연구결과는 거의 찾아볼 수 없는 실정이다(김상규, 1995). 따라서 이를 사용하는 현장 실무자들이 배수성능에 관하여 확고한 신뢰감을 갖고 있지 못하는 현실이다. 또한 PBD재의 배수성능에 관하여 상기와 같이 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고 PBD재를 이용하여 원활한 지반개량을 수행한 현장과 개량효과를 거의 얻지 못한 현상이 공존하는 등 아직까지 미해결된 문제점도 남아있는 실정이다. 특히 현장 실무자들이 우려하는 것은 PBD재의 두께가 3mm정도이기 때문에 간극수의 원활한 배출을 도모할 수 있는 유로의 형성에 대

한 의문을 가지는 등의 배수성능에 관하여 명확히 해명해야 할 과제가 남아 있다.

본 고에서는 상기와 같은 내용의 문제점을 규명하기 위하여 대형 강제 압밀시험장치(직경:30cm, 높이:1m)를 이용하여 국내생산 PBD재를 중심으로 기초적인 물리적 특성 및 배수성능시험을 실시하였다. 그 후에 PBD재의 웰 레지스턴스(well resistance)에 가장 큰 영향을 미치는 간극수 중에 용존된 공기(기포)가 PBD 내부에 축적되는 현상(朴, 1994)을 재 확인하고 그 영향을 검토하였으며, 이를 현장 조건을 고려하여 진공펌프를 이용한 제거방법을 적용함으로써 배수성능의 증대 효과를 거양할 수 있는지의 여부를 검토하였다.

2. 국내 PBD재의 물리적 특성

PBD재를 연직배수재로 사용할 경우, 지반에 타설하는 과정에서 발생할 수 있는 변형 및 파열과 압밀 진행중에 발생하는 굴곡(bending), 꺾임(folding), 필터슬리브의 구멍막힘(clogging) 및 유로단면적 감소 등에 따라 통수능력(discharge capacity)이 저하하여 지반 개량효과를 지연시키는 요인이 되고 있다. 이들의 영향을 최소화하기 위하여 시험을 통한 PBD재의 물리적 성질을 정확히 규명하여 두는 것이 중요하다. PBD재의 기본적인 물리적 성질에 포함되는 항목으로는 재질, 표준중량, 규격, 인장강도, 인장신도 및 투수계수 등이 있

표 1. 대표적인 PBD재의 물리적 성질(국외제품)









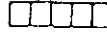


		GL	MW, MB	CS, CS ₂	TS	TF
Thickness(mm)		3.4±0.5	3.0±0.5	2.6±0.5	4.6±0.3	7.5±1.0
Width(mm)		95.8±2.0	100±20	94±2	100±3	100±5
Unit mass(g/m)		100	75	90	100	80
Material	Filter	Synthetic fiber of cellulose and polyester	Non woven fabric made from polypropylen	Spun bonded of polyester	Non woven fabric made from polypropylen	Spun bonded non woven fabric made from polyethylene
	Core	Polyolefin	Polypropylen	Polyethylene	Polyethylene	
Structural type		Free	Free	Fixed	Free	One body
Cross-section						

표 2. 대표적인 PBD재의 물리적 성질(국내제품)

	NK	SW	SH	KL	DH	DS
Thickness(mm)	2.7	3.0	3.0	2.7	3.5	3.0
Width(mm)	92.2	93.0	92.5	96.0	98.5	93.0
Permeability of filter sleeve, k ₁₅ (cm/sec)	2.7×10 ⁻¹	2.3×10 ⁻¹	2.4×10 ⁻¹	3.7×10 ⁻¹	1.2×10 ⁻¹	4.7×10 ⁻¹
Structural type	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed	Free	Fixed
Cross-section						

다. 표 1, 2.에는 대표적인 PBD재의 물리적 성질을 국외제품과 국내제품으로 나누어 나타냈다.

연약지반 개량재로 PBD제품을 선정할 경우 여러 특성을 고려해야 하나 그 중 가장 중요한 요건은 배수성능 및 인장강도의 확보이다. 배수성능에 관해서는 후에 논의하기로 하고 여기서는 인장강도에 관해서 기술하고자 한다. PBD재의 인장강도는 타설 및 압밀과정에서 발생하는 파손과 직접적인 관련이 있으므로 매우 중요한 특성이다.朴(1994)에 의하면 3년간의 장기간에 걸쳐 연약지반의 변형률이 약 40%에 달할 때까지 압밀시킨 후에 PBD재의 형상을 육안 관찰한 결과 여러 개소에 파손현상이 나타나 있음을 지적하고 있으며, 新舍 등(1987)에 의해서도 유사한 결과가 보고되어 있다.

Kremer 등(1982)은 PBD 전체에 대하여 인장강도가 어떠한 경우에도 0.5kN이상이어야 하며, 파괴시의 변형률은 2%이상 10%이하를 권장하고 있다. 그림 1.에는 朴(1994)이 5종류(CS, CS₂, GL, MW 및 TS)의 국외제품에 대하여 인장시험을 실시한 결과를 나타낸다. 시험에 이용된 5제품 모두 인장강도는 Kremer 등(1982)이 제시한 규정치를 상회하고 있는 반면, 파괴시의 변형률은 20% 부근에 있음을 알

수 있다. 과도한 침하가 예상되는 연약지반에 PBD재를 적용하는 경우 파괴시의 변형률은 클수록 유리하다고 판단된다. 국내 생산제품의 인장강도 파악과 국외제품과의 비교를 위해서 8종류(국내 : 6종, 국외 : 2종)의 PBD재에 대한 인장강도시험을 실시했다. 시험은 KSK 0520 규정에 의하여 실시하였으며, 폭 및 두께는 각사의 기성제품을 그대로 이용하였다. 시료의 길이는 30cm로 하였으며, 인장속도는 10±3

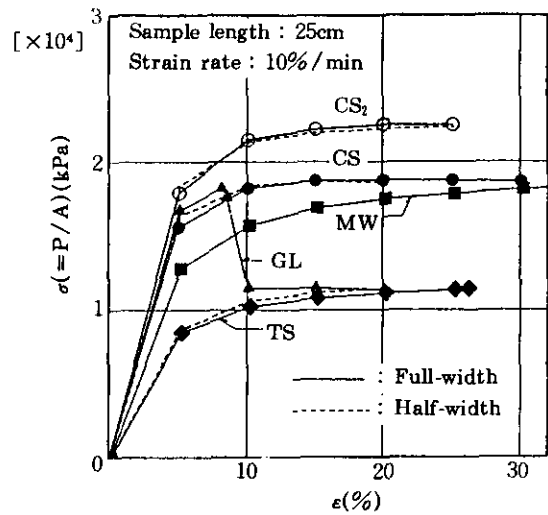


그림 1. 인장시험에 의한 응력-변형곡선(朴, 1994)

표 3. PBD재의 인장시험 결과표

Nationality	Product name	Size		σ_t (kgf/cm ²)	Ductility		R.M.
		Length (cm)	Thickness (mm)		Δl (cm)	Percent elongation (%)	
Korea	HK	30	2.5	101.5	2.5	31.3	
	SW	30	2.6	64.8	38.5	48.1	
	SH	30	2.6	45.2	4.0	62.5	
	DS	30	2.8	41.9	1.2	15.4	
	KL	30	2.6	37.0	18.0	22.5	
	DH	30	3.10	36.2	49.7	62.1	
Japan	MB	30	3.50	130.0	5.0	65.8	
	GL	30	2.60	200.0	3.0	36.4	

%/min이고 시험치는 각 제품에 대하여 2~3 회씩 시험한 값의 평균치를 취했다.

표 3.에는 인장시험 결과를 나타낸다. 표 3.에서 알 수 있는 바와 같이 국내제품의 인장강도는 36.2~101.5kgf/cm²의 범위를 나타낸다. 이는 국외제품 130~200kgf/cm²보다 훨씬 낮은 값을 나타내며, 그 중 4종류는 Kremer (1982)의 기준에 약간 미달되는 현상을 보인다. 국외제품은朴(1994)이 실시한 시험치인 인장강도 $\sigma_t=11,000\sim 22,000\text{kPa}$ (110~220kgf/cm²)과 거의 같은 값을 보여 시험방법상의 문제점은 없는 것으로 사료된다. 신도에 있어서는 국내제품이 15.0~62.5%의 범위인데 대하여 국외제품은 36.4~62.5%의 범위를 나타내어 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

3. 배수성능시험

국내 생산 PBD재의 배수성능을 검토하기 위하여 대형 시험장치를 이용한 실내시험을 실시하여 측압, 동수구배 및 PD재의 변형 등에 따른 통수능력(discharge capacity, Q_d : 단위 시간당 통수량, q_w /동수구배, i)을 측정하고, 기 발표된 외국문헌(嘉門·伊藤, 1984; Jamiolkowski, 1983; Hansbo, 1986; Holtz 등, 1989; Pradhan 등, 1991; 朴, 1994)의 국외제품과 통수능력을 비교하였다. 또한 PBD재 내부에 축적되어 통수능력저하에 큰 영향을 미치는 공기(기포)의 생성을 재확인하고 현장에서 가능한 진공펌프를 이용한 공기(기포)의 제거로 통수능력의 향상을 검토하였다.

3.1 시험장치 및 방법

그림 2.와 같은 시험장치를 이용하여 PBD재의 배수성능을 검토했다. 시험장치는 강재의 대형 원통형의 본체(직경:30cm, 높이:100cm; 삼축셀과 같은 구조)와 유출·입 수조, compressor 및 진공펌프 등의 부대장치로 구성되어 있다. 시험에 사용된 PBD재는 표 1., 2.에

각 특성을 나타낸 6종의 국내제품과 3종의 국외제품이다. 실험수행을 위하여 원통형 중심부에 PBD재(폭:10cm, 길이:70cm)의 상하단을 저판과 내부상판의 홈에 끼워 고정시킨 후에 측압수가 PBD재 내부에 침투하는 것을 방지하기 위하여 PBD주위에 신축성이 크고 얇은 고무막($t=0.8\text{mm}$)으로 밀봉시켰다.

PBD재의 세트가 종료되면 원통과 저판 및 상판을 볼트와 너트를 이용하여 일체화시켰다. 측압용 및 PBD의 통수능력 시험용 물이 다량으로 소요되므로 수도수를 사용하였으며, 이는 종류수보다 현장조건에 더욱 가까운 특성을 가진다고 판단하였다. PBD재의 통수능력 측정은 실험장치 장착후 유입수조의 수도수를 PBD재의 하부에서 상부로 통수시켜 일정시간 경과후 통수량이 안정된 후에 일정간격으로 유출수조를 통해 배출되는 유량을 각 2회씩 측정하여 평균치로 구하였다. 장치의 손실수두는 PBD의 통수단면적 보다 훨씬 큰 호스(직경:3cm)를 사용하는 등의 배려를 하여 수두차가 70cm($i=1.0$)인 경우에 1.1cm(1.6%)로 작았기 때문에 무시했다. 수온은 15℃를 기준으로 보정했다.

실험은 각 PBD재의 종류별로 일반적인 현장조건에 맞는 범위에서의 통수능력의 변화를 검토하기 위하여 측압, 굴곡 및 동수구배를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 현장타설심도에 대응하는 측압은 3종($\sigma_s=0.5\text{kgf/cm}^2$ (50 kPa), 2.0kgf/cm^2 (200kPa), 4.0kgf/cm^2 (400 kPa))의 조건으로 수행하였다. PBD재의 변형형상에 따른 통수능력의 차이를 규명하기 위하여 그림 3.에 나타낸 것과 같이 3종의 굴곡조건(직립, 30% 자유변형, 1개소 강제절곡)상태에서 실시하였다. 30% 자유변형 조건은 70cm의 PBD를 연직길이 50cm가 되도록 자유변형을 준 상태이고, 강제절곡 조건은 30% 자유변형시킨 후 굴곡부 1개소를 인위적으로 완전히 꺾은 상태에서 양쪽면에 2개의 강철판(폭:12cm, 두께:0.3cm)을 서로 맞대고 볼트 및 너트를 이용하여 완전히 죄었다. 또한 압밀의 진행에

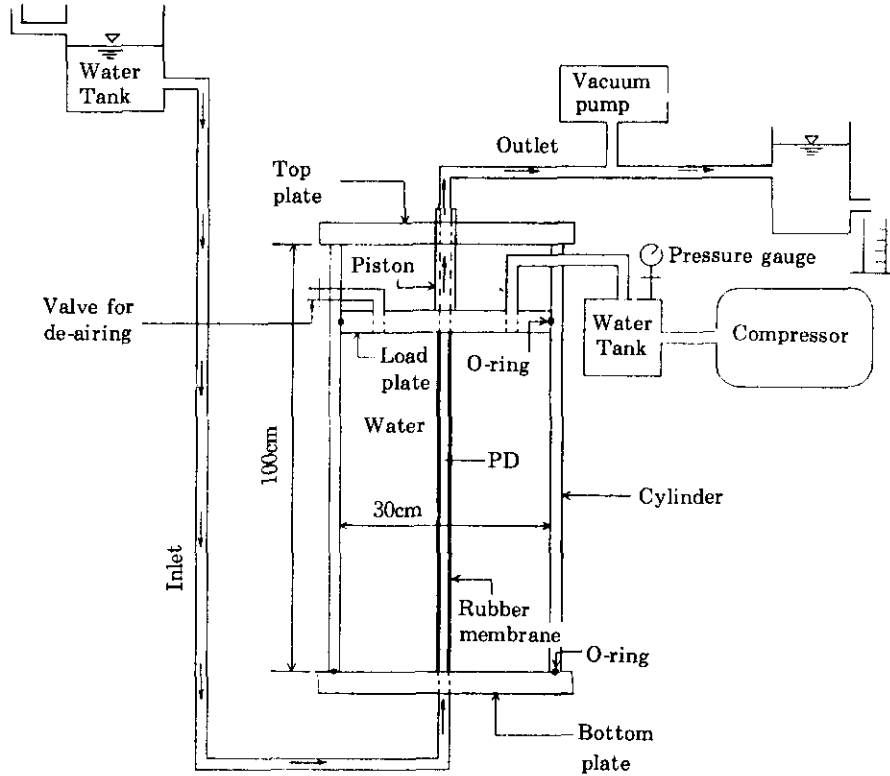


그림 2. PBD의 통수능력측정을 위한 실험장치도

Axial deformation (%)	Straight	Free bending (30%)	Folding (1 Place)	Folding (2 Place)
10	[Straight vertical line]	[Slightly curved line]	[Line with one sharp fold]	[Line with two sharp folds]
20				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				

O : Folding place

그림 3. 통수능력시험을 위한 굴곡조건

따라 변화하는 동수구배는 8가지($i=0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$)의 조건을 사용하였으며, PBD재의 길이는 일정하게 유지하고 유출

· 입 수조의 수두차를 달리하여 조정하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 측압(σ_s)의 영향

국내 생산 PBD재의 타설심도에 따른 통수능력(Q_w)의 변화를 검토하기 위하여 측압(σ_s)의 영향을 검토해 본 결과 측압이 증가할수록 Q_w 는 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 측압이 증가할수록 수분에 의해 연화된 필터 슬리브(filter sleeve)가 코어(core)의 흡 속으로 끼어드는 양이 증가되어 상대적으로 PBD재 내부의 유로 단면적이 감소되기 때문이다. 감소 경향은 PBD재의 제조방법, 필터 슬리브의 재질과 코어의 재질 및 형상 등에 따라 다르다.

그림 4.에는 측압과 통수능력의 관계를 국외제품의 실험결과와 병행하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 대표적인 6종의 국내 생산제품의 측압 증가에 따른 통수능력의 저하특성은 국외제품과 유사한 경향을 나타내고, 높은 측압, 즉 타설심도 약 80m에 상당하는 $\sigma_3=4.0\text{kgf/cm}^2(400\text{kPa})$ 에서도 최소 통수능력 $Q_{w, \min}=13\text{cm}^3/\text{sec}$ 을 나타낸다. 이는 동수구배(i)가 1.0, 직립조건인 상태에서 여러 학자(Jamiolkowski et al., 1983; 嘉門·伊藤, 1984; Hansbo, 1986; Holtz et al., 1986; 朴, 1994)들에 의해 수행된 품질이 우수한 PBD재와 유사한 배수성능을 나타낸다. 따라서 지반 개량 대상지반의 토질특성을 정확히 파악하고 시공을 합리적으로 실시할 경우 연약지반개량 현장에 적용하면 국내 PBD재도 효과적으로 기능을 수행할 것으로 판단된다.

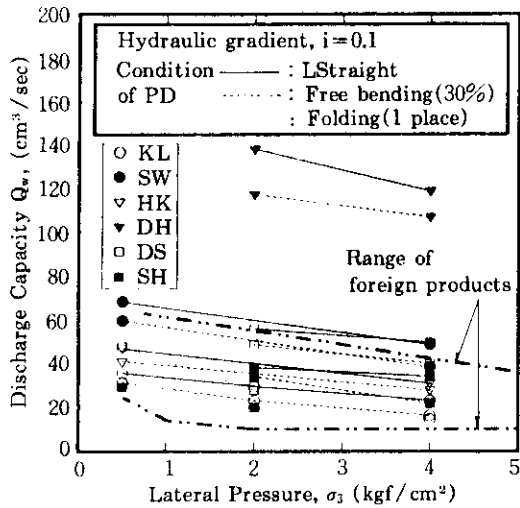
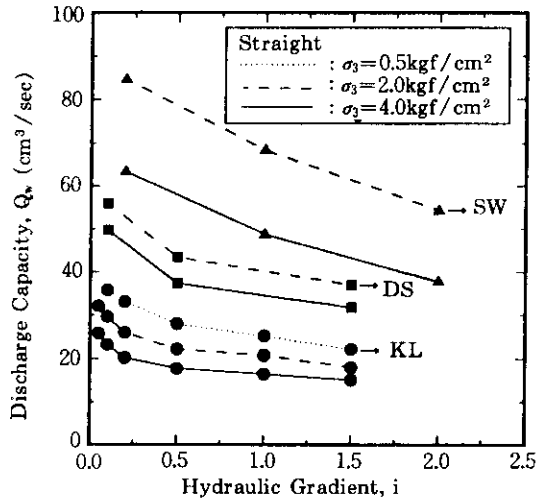


그림 4. 측압(σ_3)에 따른 통수능력(Q_w)의 변화

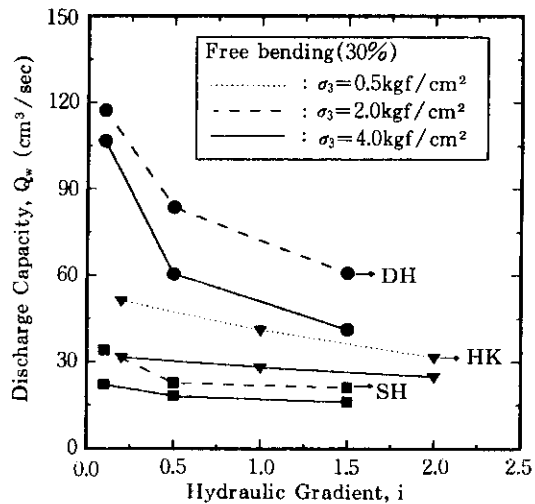
3.2.2 동수구배(i)의 영향

그림 5.(a), (b)에는 직립조건과 30% 자유변형 조건에서 동수구배의 변화에 따른 Q_w 의 변화관계를 나타냈다. 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 측압조건에 대해서도 동수구배가 증가할수록 Q_w 는 감소한다. 이는 PBD재 내부의 흐름상태가 층류에서 난류상태로 변해

감에 따라 흐름자체가 불안정해지기 때문으로 판단된다. 또한 초기 통수능력이 큰 제품일수록 동수구배의 증가에 따른 Q_w 의 저하가 현저한 것이 주목된다. 일반적으로 침투유속이 작은 경우에는 Darcy의 법칙이 성립하여 흐름이 안정하게 되지만 침투유속이 큰 경우에는 흐름 중에 와류가 발생하여 에너지 손실이 급격히 증가하여 흐름이 불안정하게 된다. 또한 $i < 0.5$



(a) 직립조건



(b) 30% 자유변형조건

그림 5. 동수구배(i)에 따른 통수능력(Q_w)의 변화

의 영역인 경우에는 흐름이 층류상태를 나타내고 있음에도 불구하고 미소한 수두차 Δh 의 변화에 현격한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 낮은 동수구배 영역에서 Q_c 치의 큰 변화는 실험장치 및 시료의 길이 등의 영향도 일부 작용한다고 판단되나 명확한 원인은 향후 해명해야 할 과제이다.

그림 6.에는 4종의 PBD재에 대하여 각 동수구배에서의 유속의 변화를 나타냈다. PBD재 내부의 흐름은 동수구배가 증가할수록 층류(laminar flow), 천이류(transition flow), 난류(turbulent flow)로 바뀌면서 유속이 빨라지지만, 층류영역에서는 Darcy법칙이 성립하여 동수구배와 유속 사이에 직선적인 관계를 나타내는 반면 천이류, 난류영역에서는 직선적인 관계가 성립하지 않는다.

일반적으로 Darcy법칙은 식 (1)과 같다.

$$\begin{cases} v = k \cdot i & \text{: 층류영역} \\ v = a + b \cdot i^m & \text{: 난류영역} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, v : 유속(cm/sec), i : 동수구배, a, b : 정수, m : 1~2 사이의 정수

그림 6.에서 알 수 있는 바와 같이 유속으로 판단하면 각 동수구배에 대해 PBD재 내부의 유속이 약 3cm/sec와 5cm/sec 사이에서 천이류 영역이 형성되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 흐름의 분류는 Reynolds 수(R_e)를 이용하여 구할 수 있으며, R_e 는 식 (2)로써 구할 수 있다.

$$R_e = \frac{v \cdot d_w}{\nu}$$

$$\begin{cases} R_e < 2000 & \text{: 층류영역} \\ 2000 < R_e < 4000 & \text{: 천이류 영역} \\ R_e > 4000 & \text{: 난류영역} \end{cases} \quad (2)$$

여기서, v : 유속(cm/sec), d_w : PBD재의 등치 환산원의 직경(cm), ν : 물의 동점성 계수(cm^2/sec)이다.

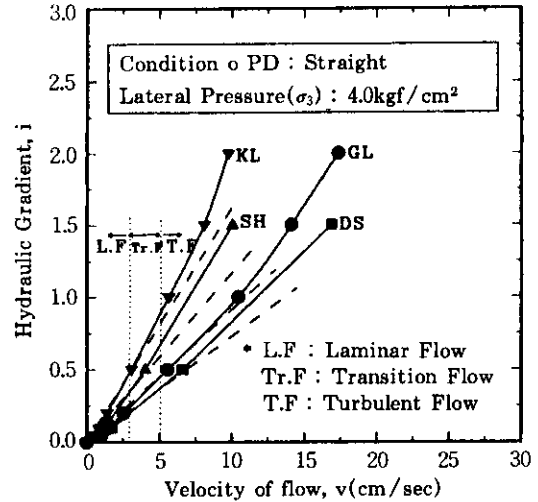


그림 6. 각 동수구배(i)에 따른 유속(v)의 변화

표 4.에는 그림 6.에 나타난 4종의 제품에 대하여 각 동수구배에서의 Reynolds 수를 식(2)를 이용하여 구한 결과를 나타냈다. 표 4.에서 알 수 있는 바와 같이 동수구배 $i=0.5$ 를 경계로 천이류 및 난류 영역이 형성됨을 알 수 있는데 이러한 결과는 실제 현장에 있어서 PBD재 내부의 흐름은 대부분 층류상태를 유지할 것으로 판단되므로 $i < 0.5$ 영역의 범위에서 실

표 4. 동수구배(i)에 따른 레이놀드수의 변화

product name	Hydraulic gradient	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
GL		720	1,080	1,779	3,856	7,227	9,753	21,017
KL		315	581	987	2,156	3,955	5,656	6,825
SH		.	839	.	2,756	.	6,849	.
DS		.	1,167	.	4,384	.	11,177	.

내시험을 실시하는 것이 바람직하다는朴·三浦(1994)의 주장을 입증하게 되었다.

3.2.3 PBD재 변형의 영향

그림 7.에는 동일한 동수구배($i=0.1$)와 측압($\sigma_3=2.0\text{kgf/cm}^2$)조건에서 대표적인 외국제품(GL)과 3종의 국내제품(DS, SW, KL)에 대하여 PBD의 변형에 따른 Q_w 의 변화를 비교한 결과를 나타냈다. PBD재의 Q_w 가 직립 조건에서 1개소 강제절곡 조건으로 갈수록 감소하며 1개소 강제절곡인 경우의 Q_w 는 직립조건의 약 50%~72%를 나타냈다. 또한 GL이 국내 제품에 비해 Q_w 가 다소 크게 나타났으며, PBD재의 재질 및 core의 형상에 따라서 30% 자유변형 조건에서 Q_w 가 크게 감소하는 것과 강제절곡에서 Q_w 의 저하가 큰 경우로 나누어진다.

표 5.에는 전술한 바와 같은 각 조건(측압, 동수구배 및 PBD재의 변형의 영향 등)에서 실험을 실시하여 측정된 국산 PBD재의 종방향 통수능력과 여러 연구자들에 의해 측정된 외국 PBD재의 종방향 통수능력을 상호 비교한 결과를 나타냈다. 상기의 결과와 같이 각 조건에서 국내제품과 외국제품은 통수능력면에서는 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 따라서 국산 PBD재를 연약지반개량의 현장에서 사용하여도 종방향 통수능력에는 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

표 5. 국내·외 PBD제품의 통수능력(Q_w)비교

Domestic(6 kinds)		Foreign(6 kinds)	
Condition	Range of Q_w (cm^3/sec)	Condition	Range of Q_w (cm^3/sec)
Straight $i=1.0$ $\sigma_3=0.5\sim 4.0\text{kgf/cm}^2$	19~50	Straight $i=0.9$ $\sigma_3=50\sim 400\text{kPa}$	10~78 (Kammon et al., 1991)
30% Free bending $i=1.0$ $\sigma_3=0.5\sim 4.0\text{kgf/cm}^2$	16~60	20% Free bending $i=0.9$ $\sigma_3=50\sim 40\text{kPa}$	3~53 (Pradhan et al., 1991)
Folding(1 place) $i=1.0$ $\sigma_3=0.5\sim 4.0\text{kgf/cm}^2$	18~31	Folding(1 place) $i=0.9$ $\sigma_3=50\sim 400\text{kPa}$	10~40 (Park, 1994)

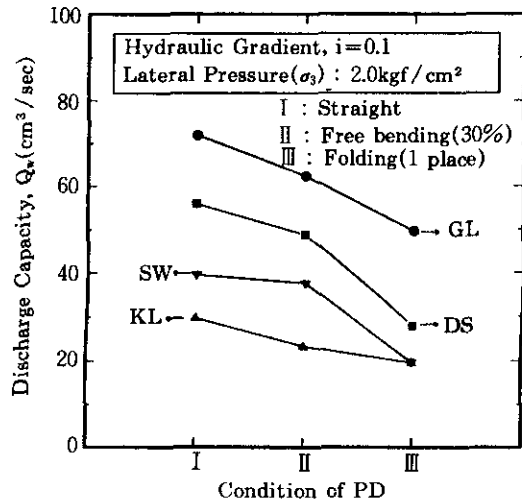


그림 7. PBD의 굴곡에 따른 Q_w 의 변화

3.2.4 공기(기포)의 영향

대형 압밀실험장치를 이용하여 각 PBD재를 이용하여 일정한 동수구배 및 측압조건으로 장기 통수능력실험을 실시한 결과를 그림 8.(a), (b)에 나타냈다. 그림 8.(a)에는 4종의 PBD재의 공기(기포)에 의한 Q_w 의 저하와 진공펌프를 이용하여 공기(기포)제거에 따른 Q_w 의 향상효과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 Q_w 가 감소하다가 CS는 약 80시간, MW는 약 100시간 후에 PBD재를 통한 통수가 중단되어 Q_w 가 0이 되

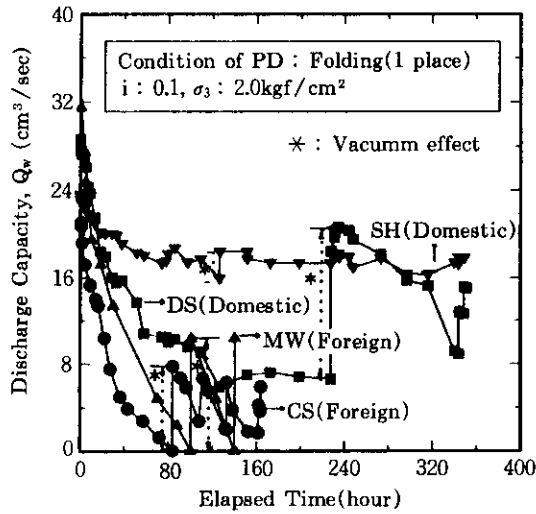
었다. 반면에 DS와 SH는 약 130~230시간 후에 각각 초기 Q_w 에 비해 76%와 23%까지 Q_w 가 감소한 상태에서 공기(기포)를 제거하였다. 공기(기포)는 진공펌프(용량 : 40ℓ/min)를 이용하여 제거한 결과 초기 Q_w 에 비해 CS, MW(진공압:30cmHg, 진공시간:1분)는 각각 37%, 33%까지 Q_w 가 향상되었으며, DS 및 SH(진공압:60cmHg, 진공시간:1분)는 각각 72%, 26%까지 Q_w 가 향상되어 진공펌프에 의

한 진공효과를 확인할 수 있었다. 그리고 진공펌프를 이용하여 공기를 제거한 후 약 40시간 경과하면 다시 공기가 누적되어 Q_w 가 감소하므로 진공펌프를 주기적으로 사용해야만 되는 것을 시사하고 있다.

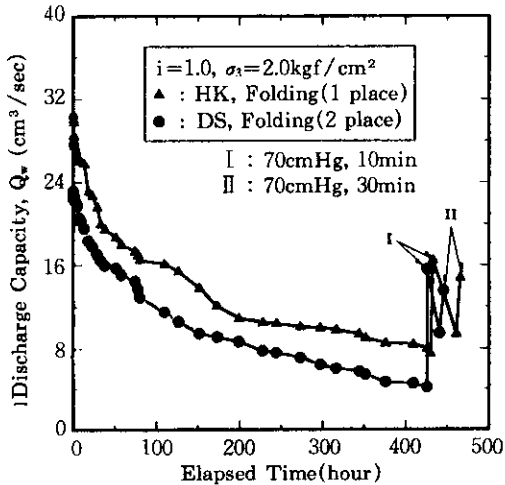
그림 8.(b)에는 1개소 강제절곡한 HK 제품과 2개소 강제절곡한 DS 제품을 이용하여 PBD재 내부의 공기(기포)확인과 진공펌프에 의한 통수능력 향상을 측정된 결과를 나타냈다. 실험결과 두 제품 모두 초기상태에서 Q_w 가 계속 감소하다가 약 430시간 후에 진공펌프(진공압:70cmHg, 진공시간:10분, 30분)를 이용하여 진공시킨 결과 초기 Q_w 에 비해 각각 54%, 67%까지 통수능력이 향상되었다.

효과적인 진공압과 진공시간에 대한 효과를 검토하기 위하여 PBD재 내부와 그 상부에 연결된 호스내의 유량을 진공압과 진공시간을 달리하여 배출하는 실험을 실시했다. 실험에 사용된 PBD재는 국내의 HK 제품으로 길이 $L=70\text{cm}$, 동수구배 $i=0.05$, 축압 $\sigma_3=2.0\text{kgf/cm}^2$ 의 조건으로 일정시간 통수시험을 실시하였으며, 3조건(직립, 30% 자유변형 및 1개소 강제절곡)에 대하여 4종의 진공압(20cmHg, 0cmHg, 50cmHg, 70cmHg)으로 진공효과를 검토했다.

그림 9.(a), (b), (c)에 각 조건에 대한 진공압과 진공시간의 차이에 의한 배출수량의 변화를 나타냈다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 모두 진공압과 진공시간이 클수록 진공효과가 크다는 것을 알 수 있다. 진공압이 클수록 짧은 시간에 PD재 및 상부 호스내의 유량이 전부 배출되었고, 낮은 진공압(20cmHg, 30cmHg)에서는 진공시간을 길게 해도 유량이 모두 배출되지 않는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 진공압과 시간에 대해 직립에서 1개소 강제절곡 조건으로 갈수록 진공효과가 감소하였다. 즉, 본 실험조건에 있어서 동일한 진공압과 진공시간에 대해서는 직립 조건이 배출량이 가장 많았으며, 직립 조건인 경우에는 진공압 30cmHg에 대해서도 120분이 경과하면 PBD재 내부와



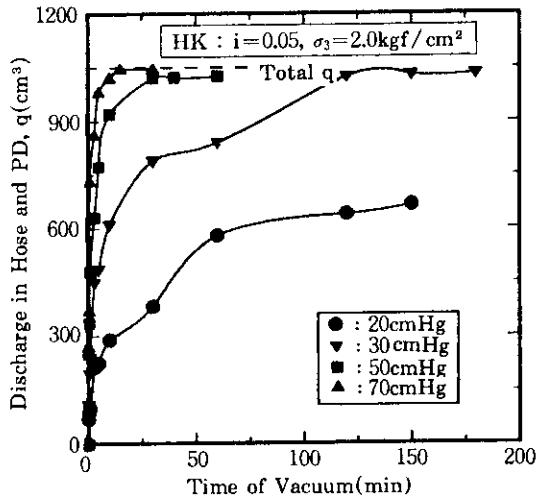
(a) 국내·외 제품비교



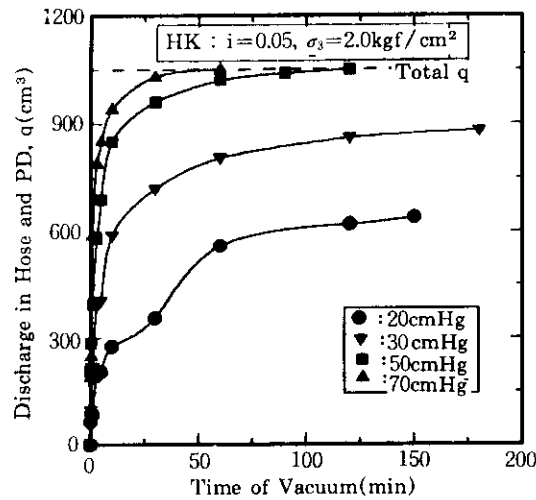
(b) 절곡수에 따른 변화

그림 8. 장기통수능력 시험결과 및 진공효과

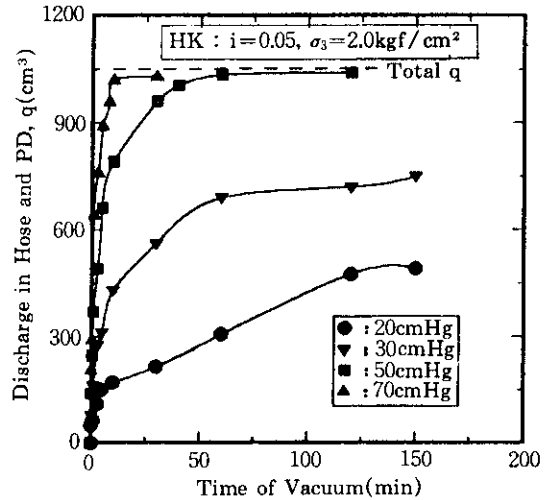
상부 호스내의 유량이 전부 배출된다. 이는 직립 조건인 경우 PBD재 내부의 유량배출이 더욱 용이함을 나타낸다. 또한 30% 자유변형과 1개소 강제절곡 조건에서는 50cmHg와 70cmHg의 진공압이 효과가 있음을 나타냈다. 50cmHg의 진공압으로 배출시킨 경우 두 조건 모두 진공시간이 약 120분 경과 후에 호스와 PBD재 내부의 유량이 전량 배출됨을 알 수 있었으



(a) 직립조건(L=70cm)



(b) 30% 자유변형(L=70cm)

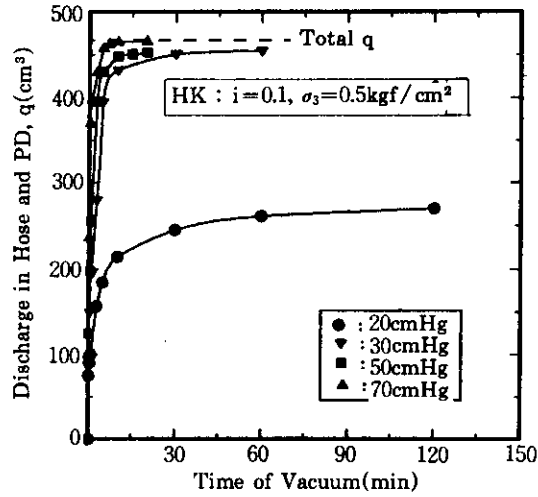


(c) 1개소 강제절곡

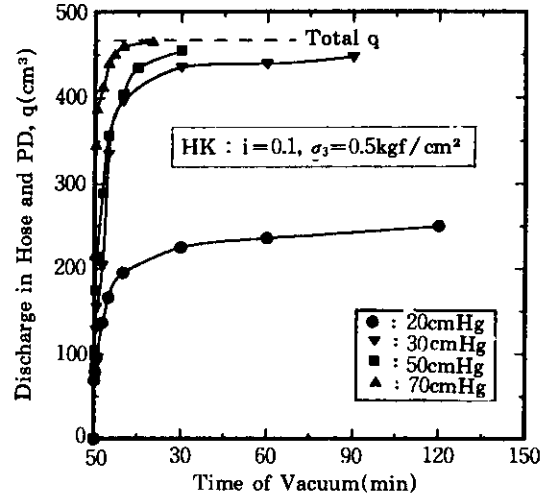
그림 9. 진공압 및 시간에 따른 배수량(q)의 변화

며, 70cmHg의 진공압의 경우 두 조건 모두 약 30분의 진공시간으로 PBD재 내부와 상부 호스내의 유량이 거의 배출되었다.

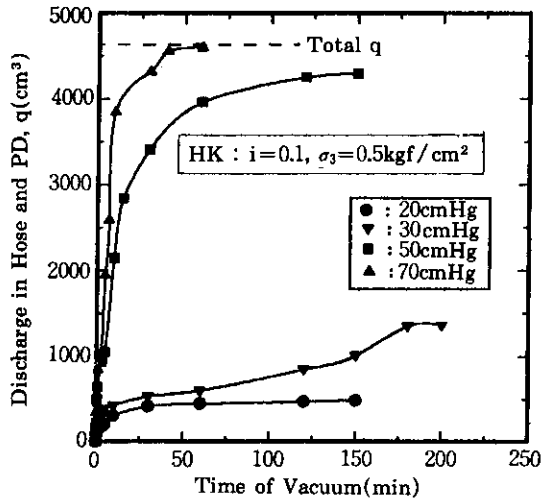
현장에서 실제 시공되고 있는 PBD재의 길이에 대한 진공압과 진공시간의 효과를 고찰하기 위하여 본 실험에서는 국내제품인 HK제품으로 길이 L=2m, 20m 및 2가지 변형조건(직립, 1개소 강제절곡)으로 동수구배 $i=0.1$, 축압 $\sigma_3=0.5\text{kgf/cm}^2$ 의 조건으로 실험을 수행한 결과를 그림 10.(a), (b), (c) 및 (d)에 각각 나타냈다. PBD재의 길이 2m에 대한 실험 결과((a), (b)) 두 조건 모두 20cmHg의 진공압에서는 PBD재 내부의 유량이 50% 정도 배출되어 진공효과가 미소하지만 다른 진공조건(30cmHg, 50cmHg, 70cmHg)에서는 약 30분에서 90분 정도까지 진공을 가하면 PBD재 내의 유량이 거의 배출되는 것을 알 수 있으며 동일한 진공시간에 대해서 진공압을 크게 해주는 것이 더 효과적임을 알 수 있다. PBD재 길이 20m에 대한 실험 결과((c), (d))는 직립과 1개소 강제절곡 조건 모두 두 진공압(20cmHg, 30cmHg)에서는 진공효과가 거의 나타나지 않



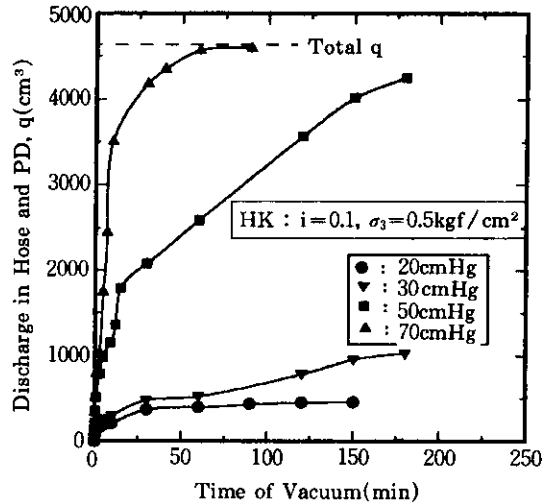
(a) 직립, L=2m



(b) 1개소 강제절곡, L=2m



(c) 직립, L=20m



(d) 1개소 강제절곡, L=20m

그림 10. PBD재의 길이 및 굴곡조건에 따른 진공효과 변화

았으며, 50cmHg, 70cmHg의 진공압에서는 상당히 큰 진공효과를 나타내는데 특히 70cmHg의 진공압으로 약 60분~90분간 진공시키면 PBD재 내부의 유량이 거의 배출되었다.

위에서 언급한 바와 같은 진공압과 진공시간에 따른 효과를 고찰한 결과 70cmHg의 진공압으로 약 50분간 진공을 가하면 PBD재 내의

유량이 배출됨과 동시에 공기(기포)도 함께 제거될 수 있다고 판단되므로 현장에서 이와 같은 조건으로 사용하면 공기(기포)에 의한 통수능력 저하의 영향은 제거될 것으로 사료된다. 그러나, 본 실험은 PBD재만을 대상으로 통수시험을 실시한 결과이기 때문에 PBD재 주위에 연약한 점성토를 채운 조건에서 실제

현장과 같은 조건의 통수능력 시험을 실시하여 공기(기포)를 제거함에 있어서 최적의 진공압과 진공시간을 도출해야 할 필요가 있다고 판단된다. 또한 공기(기포)의 누적이 주로 PBD재의 꺾인 부분에서 발생하므로 꺾임현상이 상대적으로 적은 원형 플라스틱 드레인재를 현장에 적용하는 것이 유리하다고 판단되며, 이에 관한 상세한 보고는 차후에 하기로 한다.

4. 결론

본 연구에서는 대형 압밀시험장치를 이용하여 국내 생산 PBD재의 강도특성과 종방향 통수능력의 검토를 실시하여 성능을 확인한 후 공기(기포)에 의한 통수능력의 저하와 현장에서 적용가능한 진공펌프를 이용하여 공기(기포)를 제거하여 PBD재의 통수능력 향상효과를 실험한 것으로 주된 결론은 다음과 같다.

- 1) 국내 생산 PBD재의 인장강도는 36.2~101.5kgf/cm²의 범위를 나타낸다. 이는 국외제품 130~200kgf/cm²보다 낮은 값을 나타내며, 그 중 4종류는 Kremer (1982)의 기준(0.5kN)에 약간 미달되는 현상을 보인다. 반면에 신도는 국내제품이 15.0~62.5%의 범위인데 대하여 국외제품은 36.4~62.5%의 범위를 나타내어 큰 차이가 없다.
- 2) 국내 생산 PBD재는 종방향 통수능력면에서 국외제품과 거의 유사한 값을 나타내며, 연약지반개량 현장에 적용시에는 웰 레지스턴스(well resistance)에 의한 문제는 적을 것으로 판단된다.
- 3) PBD재의 통수능력에 가장 큰 영향을 미치는 것은 PBD재 내부에 누적되는 공기(기포)라고 판단되며, 이 영향에 의해서 PBD재의 통수능력 제로(0)까지 저하하는 경우도 있다.
- 4) PBD재 내부에 누적되어 통수능력 저하를 유발하는 공기(기포)는 진공펌프로 제거가 가능하며, 진공압이 크고 진공시간이 길수록 더욱 효과적임을 알았다.

본 연구에서는 PBD재만을 대상으로 통수시험을 실시한 결과이므로 향후 현장조건과 동일하게 PBD재 주위에 연약한 점성토를 채운 상태의 복합적인 배수성능의 검토가 실시되어 현장 적용 가능성의 여부를 판단할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 전기 영남대학교 신입교원 정착연구비에 의해 수행되었으며, 연구비를 지원해준 영남대학교와 실험 및 자료정리를 도와준 이 시한 군(현 한국건설기술연구원 근무)에게 심심한 사의를 표한다.

참고 문헌

1. 김 상규(1995), 밴드 드레인의 품질관리와 연약지반 개량효과와의 관련, '95 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 1~20.
2. 김 성환, 노 한성, 김 홍종(1996), 연약지반처리를 위한 플라스틱 배수공법, '96 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 265~273.
3. 김 수삼(1994), 직현단지에 한국 최초로 적용된 paper drain 공법, 한국지반 공학 발자취, 한국지반공학회, pp. 221~228.
4. 박 영목(1985), 堤塘의 Geotextile Filter에 관한 實驗的 研究, 영남대학교 석사학위논문, pp. 1~19.
5. 及川 研, 中岡青貴, 神保 信雄, 河田壓司(1989), 關西國際空港建設におけるプラスチックボドドレン工法による地盤改良, 第24回土質工學會發表會, pp. 1903~1904.
6. 尾上 篤生(1991), ドレんのウェル・レジスタンスに関する基礎的研究, 清水建設研究報告別冊, 第32號, pp. 1~124.
7. 嘉門 雅史・伊藤 讓(1984), プラスチックボドドレんの機能に関する研究, 第19回土質工學會發表會.
8. 嘉門 雅史(1985), プラスチックボドドレン材料の性質とその特性, 基礎工, pp. 11~16.
9. 佐佐木 伸(1985), プラスチックボドドレン工法の現況と展望, 基礎工, pp. 2~10.

10. 新舍 博ら(1987), プラスチックドレーン材の折れ曲がりと改良効果, 第22回土質工學研究發表會, pp. 1791~1792.
11. 神保信雄(1991), 軟弱地盤改良工法, 佐賀大學理工學部建設工學科土木施工講座 資料集, pp. 1~35.
12. 朴永穆・三浦哲彦(1994), 現場條件を考慮したプラスチックボードドレーンの性能評價, 日本土木學會論文集, No. 499, III-28, pp. 51~58.
13. 朴永穆 (1994), 低平地に堆積する海成粘土の土質特性と鉛直排水工法による地盤改良に関する研究, 日本 佐賀大學 博士學位論文, pp. 1~235.
14. 三浦哲彦・朴永穆・Madhav, M. R.(1993), プラスチックボードドレーンの排水性能に関する基礎的研究, 日本土木學會論文集, No. 485, III-25, pp. 31~40.
15. Ali, F.H. (1991), The flow behaviour of deformed prefabricated vertical drains, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 10. No. 3.
16. Bergado, D.T., Asakami, H., Alfaro, M.C., and Balasubramaniam, A.S.(1991), Smear effect of vertical drains on soft Bangkok clay, *J. Soil Mech. Found. Eng.*, ASCE, Vol. 117, No. 10, pp. 1509~1529.
17. Bergado, D.T. and Long, P.V.(1994), Numerical analysis of embankment on subsiding ground improved by vertical drains and granular piles, *13th ICSMFE*, Vol. 4, pp. 1361~1366.
18. Cheung, Y.K. and Lee, P.K.(1991), Some remarks on two and three dimensional consolidation analysis of sand-drained ground, *Computer and Geotechnics*, Vol. 12, pp. 73~87.
19. Diericks, W.(1986), Model research on geotextile blocking and clogging in hydraulic engineering, *3rd Int. Conf. on Geotextile*, Vol. 3, Vienna, Austria, pp. 775~778.
20. Hansbo, S.(1979), Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 21~25.
21. Hansbo, S.(1986), Preconsolidation of soft compressible soils by the use of prefabricated vertical drains, *Ann. des Travaux Publ. de Belgique*, No. 6. pp. 553~562.
22. Hansbo, S.(1992), Preconsolidation of soft compressible subsoils by the use of prefabricated vertical drains, *Workshop on Applied Ground Improvement Technique*, Southeast Asian Geotechnical Society.
23. Holtz, R.D., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Pedroni, S.(1989), Behavior of bent prefabricated vertical drains, *Proc. 12th ISSMFE*, Rio De Janeiro, pp. 1657~1660.
24. Hird, C.C., Pyrah, I.C., and Russell, D. (1992), Finite element modelling of vertical drains beneath embankments on soft ground, *Geotechnique* 42, No. 3, pp. 499~511.
25. Holtz, R.D., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Pedroni, S.(1991), Laboratory testing of prefabricated 'wick' drains, *ICGECD, GEO-COAST '91*, Yokohama, pp. 311~316.
26. Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Wolski, W.(1983), Precompression and speeding up consolidation, *Proc. 8th ECSMFE*, Vol. 3, Spec. Session, No. 6, General Report, pp. 1241~1245.
27. Kamon, M., Pradhan, T.B.S., and Suwa, S. (1991), Evaluation of design factors of prefabricated band-shaped drains, *ICGECD, GEO-COAST '91*, Yokohama, pp. 329~334.
28. Kremer, R.H.J., Oostveen, J.P., van Weele, A.F., de Jager, W.F.J. and Meyvogel, I.J. (1983), The quality of vertical drainage, *Proc. 12th ICSMFE*, Rio De Janeiro, pp. 1377~1380.
29. Madhav, M.R., Park, Y.M., and Miura, N. (1993), Modelling and study of smear zones around band shaped drains, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp. 135~147.
30. Madhav, M.R., Park, Y.M., and Miura, N. (1995), Mechanics of kinking and buckling of plastic board drains, *Int. Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 3, No. 5, pp. 429~443.
31. Onoue, A.(1988), Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consolidation, *Soils and Foundations* 28, No.

- 4, pp. 165~174.
32. Oostveen, J.P.(1990), Comparison of drains, *Research report*, Delft Univ. of Technology.
33. Oostveen, J.P., and Troost (1990), "Discharge index tests on vertical drains", *Proc. 4th Int. Conf. Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, The Hague, Vol. 1. pp. 345~350.
34. Pradhan, T.B.S., Kamon, M. and Suwa, S. (1991), Design method for the evaluation of discharge capacity of prefabricated band-shaped drains, *9th Asian Reg Conf. Bangkok*, Vol. 1, pp. 523~526.
35. Rankilor, P.R.(1981), Membranes in ground engineering, *A Willey-Interscience Publication*.
36. Rixner, J.J., Kramer, S.R. and Smith, A.D. (1986), Prefabricated vertical drain, *FWHA /RD-86/168*, Fedral Highway Administration, Washington, D.C., Vol. 1.
37. Tanaka, H.(1990), Settlement of ground improved by band drains at the development of the Tokyo International Airport, *10th S.E. Asian Geotech. Conf.*, Taipei, pp. 133~138.
38. Vreeken, C. et al.(1983), The effect of clay-drain interface erosion on the performance of band-shaped vertical drains, *Proc. 8th Europ. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.*, Helsinki, pp. 713~716.
39. Yoshikuni, H. and Nakanodo, H.(1974), Consolidation of soils by vertical drain well finite permeability, *Soils and Foundations 14*, No.2, pp. 35~46.

(접수일자 1996. 9. 16)