

연직배수재의 통수능력 저감요인 분석을 위한 실험적 연구

Experimental Study on the Reduction of the Discharge Capacity of Vertical Drains

*1 김찬기 Kim, Chan-Kee

*2 채영수 Chae, Young-Su

*3 이강일 Lee, Kang-Il

Abstract

This paper aims at investigating the characteristics of discharge capacity according to lateral pressure, hydraulic gradient and deformation of drain materials. A series of experiments were conducted to achieve this objective. In experiments, fiber drain boards as well as harmonica and castle types of drain boards were installed in a rubber membrane, and clay in sully was filled around them. The test results showed that the harmonica type of drain boards have the greatest discharge capacity comparing to castle and fiber drain boards. The results also indicated that the hydraulic gradient has more effect on reduction of discharge capacity than the lateral pressure.

요 지

본 연구는 연직 배수재의 통수능력 저감 요인인 측방도압, 동수경사, 배수재의 변형에 의한 통수능력의 저감을 밝히기 위하여 현장조건에 가장 부합되는 고무 멤브레인 안에 하모니카형, 성곽형, 파이버형 드레인을 설치한 후 드레인 주변에 슬러리 상태의 점토를 넣고 통수능 특성에 관한 실험을 실시하였다. 그 결과 배수재의 종류에 따른 통수능력은 하모니카형, 성곽형, 파이버형 순으로 통수능력이 컸으며, 또한 측압 보다 동수경사에 대한 통수능력 감소가 높게 나타났다.

Keywords : Discharge capacity, Vertical drain, Later pressure, Hydraulic gradient

1. 서론

우리나라의 연약지반 관련 기술수준은 연약지반 처리, 지반조사, 설계, 시공, 관리 등 각 분야에서 많은 발전이 이루어지고 있으나, 아직도 부분적인 개선이 요구되는 분야가 많은 실정이다. 그 중 연직배수공법의 하나인 플라스틱 보드 드레인(plastic board

drain, PBD) 공법은 배수재의 효율성에 많은 문제점이 제기되어 과거에 활발히 상용화 되지는 못했다.

그러나 배수재에 대한 지속적인 품질의 개선, 시공방법 및 시공장비 개발 등의 연구를 바탕으로 현재에는 타 공법에 비하여 월등한 시공속도 및 시공경비가 저하되었으며, 적절한 맨드렐의 개발로 교란영향이 상당히 개선되어 국내외적으로 많은 시공실

*1 대전대학교 건설시스템공학과 부교수 (Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Daejin University)

*2 수원대학교 토목공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil Eng., Suwon University)

*3 대전대학교 건설시스템공학과 부교수 (Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Daejin University)

적을 거두고 있다.

또한 연직 배수재를 활용하여 대심도 연약지반 개량 및 실트질 지반과 같이 투수성이 큰 연약지반을 개량 할 경우, 배수재의 통수능력은 매우 중요한 요인으로 작용한다. 일반적으로 배수재의 통수능력 시험은 고무 멤브레인으로 배수재를 구속하여 행해지고 있으나, 이러한 시험은 현장에서 발생하는 여러 통수능력 저하요인을 반영하지 못한다. 현장조건에서 배수재는 해성점토와 실트질 점토에 의해 구속되어 지반의 횡방향 압력을 받아 유로 단면적이 감소하고, 필터의 공극이 막히는 현상이 발생되며, 지반의 압밀 침하로 인해 배수재의 휨(bending), 뒤틀림(twisting), 접힘(folding) 등으로 인한 배수재의 변형이 통수능력 저하를 발생시킨다.(Hansbo, 1979, 박, 1996)

따라서 본 연구에서는 배수재의 통수능력 저감요인 분석을 위해 고무 멤브레인 안에 점토를 채워서 현장에서 발생할 수 있는 조건을 최대한 반영하는 방법으로 배수재의 통수능력 실험을 실시하였다. 또한 지반이 압밀되어 침하 하면서 배수재에 일어나는 휨, 접힘과 같은 시험을 실시하여 각 조건 및 재료별 통수특성을 비교·분석하였고, 현재 새로운 친환경 배수재로 각광받고 있는 파이버형(천연마섬유, natural fiber drain, FD) 드레인재의 통수특성도 함께 비교 연구 하였으며 이와 더불어 압밀이 진행되는 동안 발생하는 배수재의 통수능력의 저감 요인이 무

엇인지를 연구하였다.

2. 배수재의 통수능력 저감요인

일반적으로 연직배수재의 배수능력은 지반 내에서 측압에 의한 코어 내 흐름통로의 체적 감소와 지반 침하에 따른 배수재의 변형, 굴곡, 구조상의 내구성 및 내열화성에 따른 재료성능감소, 세립자에 의한 구멍막힘(clogging)에 따른 투수성 저하 등과 같은 요인에 의해 총체적인 영향을 받아 통수능력의 감소가 유발된다고 볼 수 있다. 흙과 배수재가 접한 경계면에서는 물과 모체에서 유실된 미세입자의 흐름에 의해 여러 가지 현상들이 발생한다. 이러한 현상들은 배수재의 종류, 재질, 제조형태, 흙의 입도, 밀도 등에 따라 형태가 달라진다. 또한 흙과 배수재에 인접한 곳에서는 세립분이 빠져나가 브리징(bridging) 구조를 형성하거나 배수재 상부에 세립분이 퇴적되는 블라인딩(blinding)현상이 발생하고, 그림 1과 같이 배수재 내부에는 미세입자의 막힘(clogging)현상이 발생한다.

그림 2는 기존의 문헌고찰을 통해 얻은 배수재 종류에 따른 통수능력 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 배수재의 종류에 따라 다양한 크기의 통수능력 분포를 보이며 측압이 증가할수록 통수능력이 저하함을 알 수 있다.

배수재 변형은 만족하는 경우와 국부적인 꺾임으

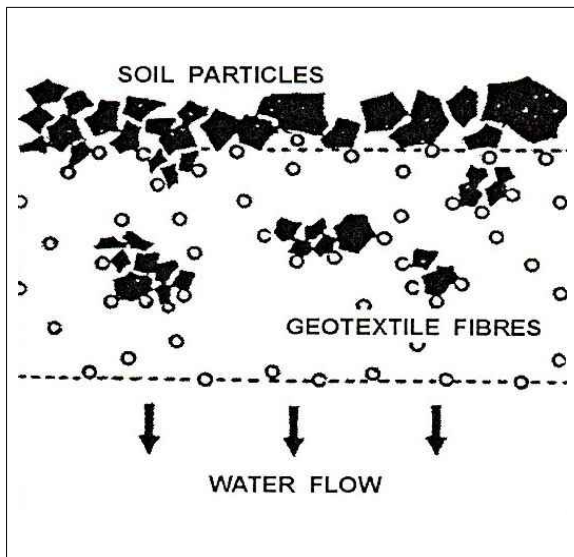


그림 1. 배수재의 막힘 현상

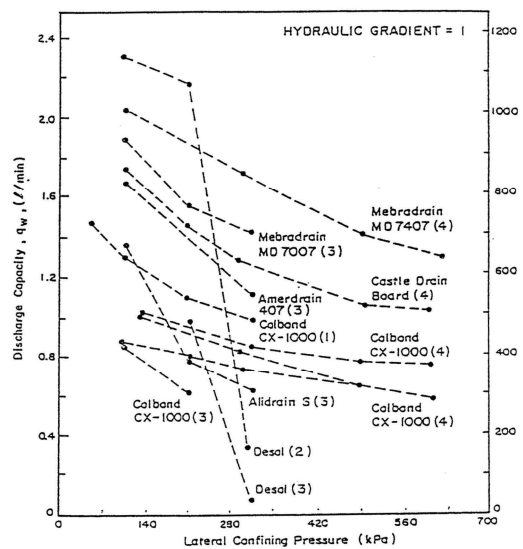


그림 2. 배수재 종류에 따른 통수능력(Rixner 등,1986)

로 분류할 수 있으며 박(1996)은 꺾임에 의한 영향으로 인하여 종방향 통수능력의 저하는 만곡에 의한 통수능력의 저하보다 많다고 하였다. Kremer등(1983)은 지반의 침하량이 층 두께의 약 15~20%를 상회하는 경우 배수재는 꺾임이 크게 발생하여 통수능력이 크게 저하한다고 보고하고 있다. Van Zanten (1986)은 만곡이나 꺾임이 생기는 경우 배수재의 통수능력은 적고 직립의 경우에 비해 약 75% 이상을 유지하고 있다고 하였다. Bergado(1996)는 배수재의 통수능력 저하에 영향을 미치는 요인으로 연직방향의 큰 변형에 의한 꺾임에 의한 영향을 강조하였다.

3. 통수능력 시험

3.1 배수재 특성

본 연구에 사용한 배수재는 포켓식 배수재로서 코어의 형상은 하모니카형, 성곽형으로 이 중 하모니카형과 성곽형은 단일코어로 되어 있으며 파이버형은 4분의 야자로프 코어로 구성되어 있으며 그 기본적인 특성은 표 1과 같다. 성곽형 배수재는 코어가 성곽모양을 하고 있고 하모니카형은 코어가 열십자 모양이다. 파이버형은 황마섬유 직물과 야자열매 껍질인 찐

연섬유로 구성되어 친 환경적인 특성을 나타낸다.

3.2 시험장치 및 점토특성

배수재의 시험시편의 길이를 결정할 때 고려사항은 전수두, 시험장치의 손실수두, 동수경사 및 기포의 영향 등이 있고 배수재의 굴곡 영향을 조사하기 위해서는 몇 개소의 강제변형을 줄 수 있는 길이가 필요하므로 시험 시편의 길이는 보통 40~50cm 정도가 필요하다. 따라서 본 연구에 사용된 시험 시편용 배수재 길이는 55cm를 사용했으며 배수재의 통수능력 시험장치는 그림 3과 같이 직경 20cm, 높이 75cm이다.

본 연구에 사용된 시료는 광양만 일대에서 채취한 점토로서 기본 물성은 표 2와 같다. 멤브레인 속에 채워진 점토는 액성한계의 2배로 교반하였고 드레인의 통수능력시험에 이용한 물은 이물질 및 기포를 제거한 양질의 증류수를 사용하였다.

3.3 시험방법

통수능력 측정은 실험장치 장착 후 배수재의 필터와 코어에 점토가 들어가는 것을 막고 배수재와 시료

표 1. 배수재의 특성

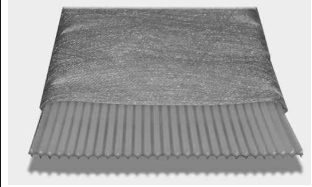
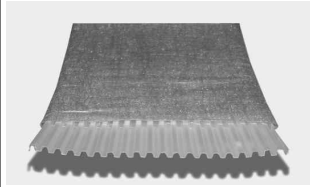

항목	단위	하모니카형 (harmonica type)	성곽형 (castle type)	파이버형 (fiver type)
재질	필터	-	PP	황마섬유 직물
	코어	-	PP	야자열매 껍질
중량	g/m	70 이상	90 이상	280 이상
폭	mm	95±5	100±5	90±5
두께	mm	3.5±0.5	4±0.5	9±0.5
배수재 단면				

표 2. 광양만 일대 점토의 기본특성

함수비(%)	비 중	액성한계(%)	소성한계(%)	통일분류
87.3	2.71	54.77	28.3	CH

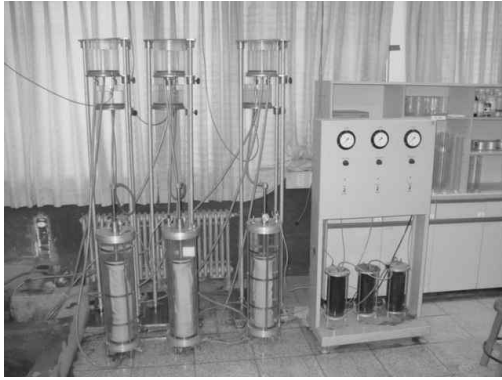


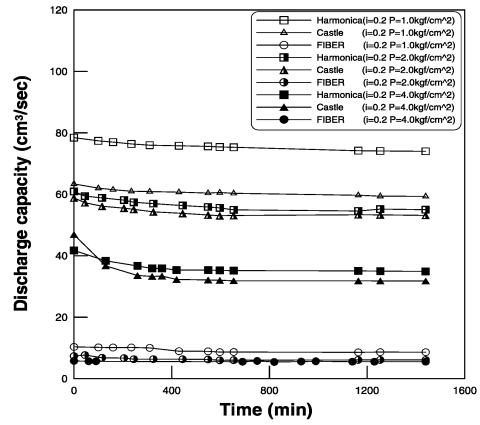
그림 3. 통수능력 시험장치

의 밀착과 예비압밀을 목적으로 초기 0.5kgf/cm^2 의 압력을 24시간에 걸쳐 점진적으로 증가시킨 후 시험에 필요한 조건의 측압을 가하였다. 실험은 현장조건에 맞는 범위에서의 통수능력의 변화를 검토하기 위해 측압과 동수경사를 변화시키면서 수행하였다. 현장 타설심도에 대응하는 측압은 1.0kgf/cm^2 , 2.0kgf/cm^2 , 4.0kgf/cm^2 로 수행하였다. 또한 압밀의 진행에 따라 변화하는 동수경사는 0.2, 0.4, 0.5로 하였으며, 측압은 압력조절장치를 이용하여 일정한 압력이 유지되도록 조정하였다. 시험순서는 먼저 대상 배수재를 55cm로 절단한 후 배수재를 상·하부 캡에 고정하고 하부 캡을 원형 압력실의 하판에 고정시킨 후 고무 멤브레인을 장착한다. 다음으로 고무 멤브레인의 상부에 시료를 채우고 압력실에 물을 채운 후 실험 조건에 맞는 측압 및 동수경사를 점진적으로 조절한다. 그 후 24시간 동안 시료를 포화시킨 후 배수재를 통과한 물을 일정시간 간격으로 유출 수조에서 배출된 유량을 측정한다.

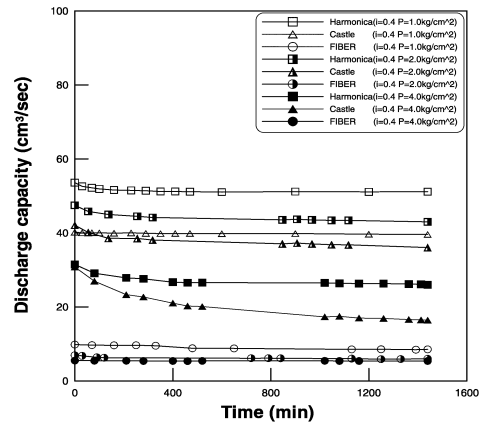
4. 시험결과 및 고찰

4.1 시간 변화의 영향

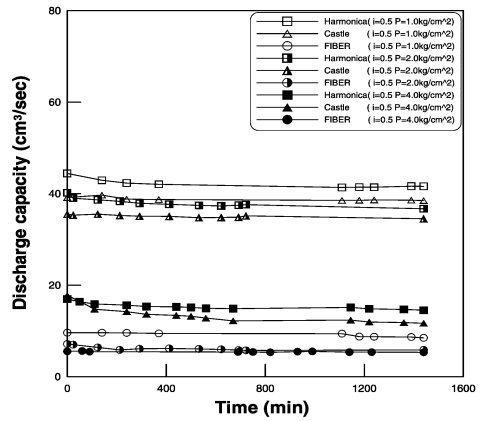
그림 4는 각 재료별로 동수경사가 0.2, 0.4, 0.5인 경우 측압의 변화와 시간에 따른 통수량의 관계를 나타낸 것이다. 실험결과에 의하면 동수경사 0.2이고 측압이 2kgf/cm^2 일 경우를 제외하고는 하모니카형이 통수량이 가장 높았으며 다음으로 성곽형, 파이버형



(a) 동수경사 $i=0.2$



(b) 동수경사 $i=0.4$



(c) 동수경사 $i=0.5$

그림 4. 시간에 따른 통수량 변화

순으로 나타났다. 통수량은 모든 배수재에서 초기에 가장 큰 값을 나타내었으며 시간이 지날수록 소폭으로 감소하였지만 초기의 400분 내에서만 통수량의 저하가 약간 관찰되었을 뿐 그 이후로는 감소량이 거의 없는 것으로 관측되었다. 이와 같은 현상이 발

생된 원인은 실험기간이 단기간이기 때문에 장기적인 조건에서 발생하는 배수재의 열화현상이나 기포 발생량이 적었기 때문이라고 사료된다.

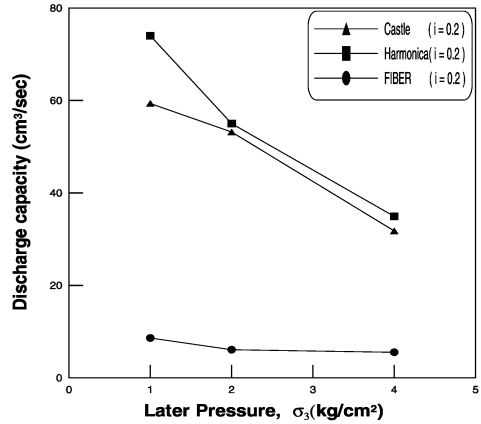
4.2 측압의 영향

그림 5는 배수재가 지반 내에 타입 되었을 때 측압에 따른 각각의 배수재의 통수량을 검토하기 위해 동수경사가 0.2, 0.4, 0.5인 경우에 대한 시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 동수경사에 관계없이 측압이 증가할수록 통수량이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 3종류 재료 중 하모니카형이 통수량이 가장 크게 측정되었으며 다음으로 성곽형, 파이버형 순으로 나타났다. 이러한 현상은 필터와 코어로 구성되어 있는 성곽형, 하모니카형은 필터에 의해 유지되던 유로가 측압이 증가하면서 필터가 코어의 틈속으로 끼어들어 배수재의 유로 단면적이 감소하였기 때문으로 판단되며, 파이버형은 섬유다발을 통해 물이 이동하므로 측압이 커진다 해도 유로 단면적에는 별다른 영향을 받지 않았던 것으로 사료된다.

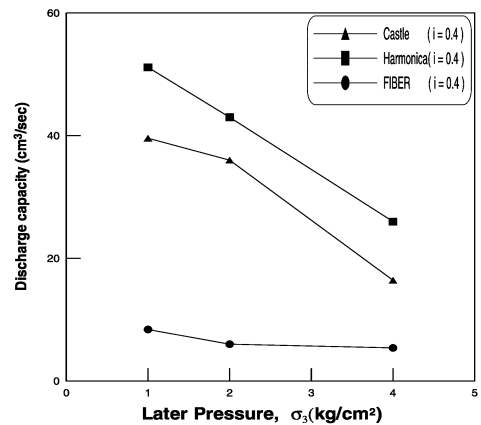
4.3 동수경사의 영향

그림 6은 측압이 각각 1.0, 2.0, 4.0kgf/cm²일 경우 동수경사의 변화에 따른 통수량의 실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 성곽형과 하모니카형의 경우 동수경사가 작은 0.2에서 0.4인 구간에서는 통수량의 감소율이 크게 나타났지만 동수경사가 0.4에서 0.5인 구간은 통수량의 감소폭이 줄어들었다. 또한 통수량의 감소 경향은 성곽형, 하모니카형 순으로 나타난 반면 통수량이 작은 파이버형은 감소폭이 매우 미미하게 나타났다. 동수경사가 증가함에 따라 통수량이 감소하는 것은 배수재 내부의 흐름상태가 동수경사가 증가함에 따라 흐름이 불안정해져 동수경사의 증가량만큼 통수능력이 비례하여 증가하지 못하기 때문이 것으로 판단된다.

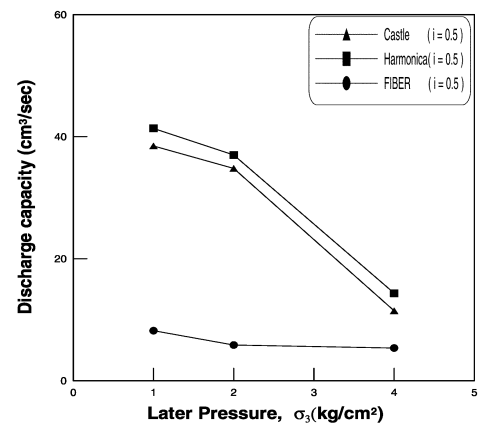
동수경사는 시간의 경과와 함께 소산되므로 시간이 지남에 따라 동수경사에 대한 영향은 작아지지만 측압에 따른 영향은 시간이 지날수록 통수단면적의



(a) i=0.2인 경우



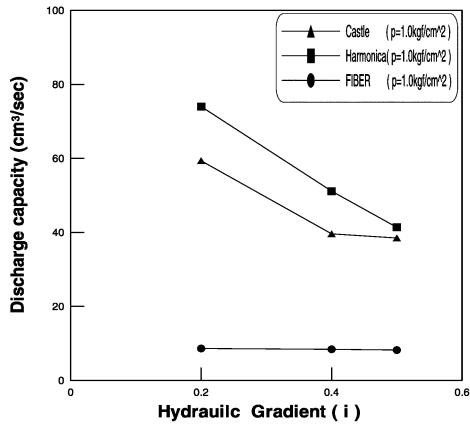
(b) i=0.4인 경우



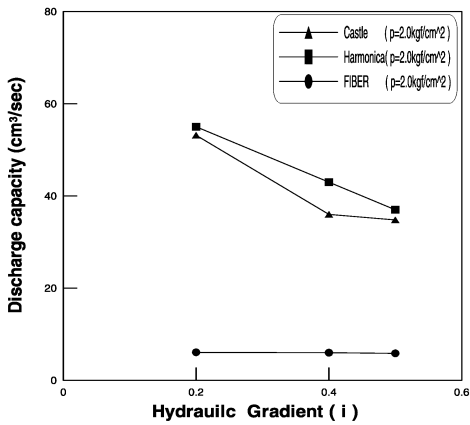
(c) i=0.5인 경우

그림 5. 측압에 따른 통수량 변화

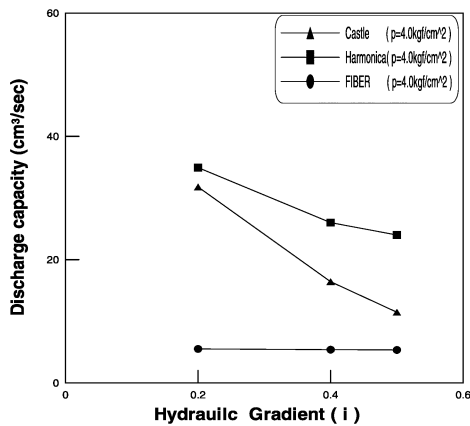
감소를 유발시킴으로 통수량 감소에 더 큰 영향을 미친다. 이로 미루어 보아 통수량 감소의 주된 원인은 동수경사의 영향보다 측압에 따른 영향이 더 큰 것으로 판단된다.



(a) 측압 1.0kgf/cm²



(b) 측압 2.0kgf/cm²



(c) 측압 4.0kgf/cm²

그림 6. 동수경사에 따른 통수량 변화

5. 통수능력 산정

5.1 기 제안된 통수능력

PBD의 통수능력은 지반개량심도가 깊은 연약지

반 또는 수평투수계수가 큰 지반을 대상으로 할 경우 압밀축진에 큰 영향을 미치는 요인이 되므로 지금까지 많은 학자들에 의해서 요구 통수능력 결정에 관한 연구가 수행되어 왔다. 각 연구자들에 의해 제안된 최소 통수량의 기준치를 표 3에 요약 하였다. 이들 결과를 종합하면 연직배수재의 통수량 기준치는 측압이 0.15~3.5kgf/cm²의 조건에서 10~1,580m³/year (0.32~50cm³/sec)로 광범위한 분포를 나타낸다. 따라서 현장에서 적용 가능한 배수재는 통수능력이 최소한 이 값의 범위 안에 들어야 함을 알 수 있다.

5.2 배수재 별 요구 통수능력 및 평가

요구 통수능력은 배수재가 지반에 타입 되었을 경우 지반의 투수계수에 따라서 간극수를 배출할 수 있는 통수능력을 말한다. 배수재의 요구통수능력 Q_{req} 는 현장의 배수재 적용 지반두께, 측압조건 그리고 기타 여러 가지 조건에 의한 영향을 받기 때문에 각 연구자별로 제시하고 있는 기준은 현실적이지 못하고 과대 산정 된 경우도 있으나 대체적으로 약 0.3~50cm³/sec의 범위로 그 차가 상당히 크다.

식 (1)은 Kamon et al.(1992)이 제안한 설계 요구 통수량을 구하는 식이다. 본 연구에서는 이 식을 이용하여 압밀도가 10%가 되는 시점에서 최종 침하량을 전 연약층 두께에 대하여 최대 변형량이 25%일때를 기준으로 산정 하였으며 배수재 타설 이후 필터의 구멍막힘 등의 영향을 고려하여 안전계수 2를 적용 하였다.

$$Q_{req} = 0.25 \cdot 0.1 \cdot F_s \cdot H \cdot \pi \cdot C_h / (4 \cdot T_h) \quad (1)$$

여기서, F_s 는 안전계수, H 는 지반의 두께, L 은 드레인 길이, C_h 는 지반의 수평방향 압밀계수(cm²/day)이다. 또한 요구 통수능력을 산출하기 위한 조건으로는 배수재의 타입길이는 15m, 배수재 타입간격은 1.0m, 영향원직경은 정방형배치로 $D_e=1.128S$, 수평방향 압밀계수(C_h)는 4.2×10^{-3} cm²/sec이며 스미어 존은 고려하지 않았으며 배수재 폭과 두께는 표 4와 같다.

표 3. 통수능력 제안 값(Bergado, 1996)

Author	Q _w (m ³ /year)	Lateral Pressure(kgf/cm ²)
Jamiolkowski et al.(1983)	10~15(0.32~0.48)	3.0~5.0
den Hoedt(1981)	95(3.0)	0.5~3.0
Kremer et al.(1982)	256(8.12)	1.0
Kremer(1983)	790(25.1)	0.15
Hansbo(1987)	50~100(1.59~3.17)	-
Rixner et al.(1986)	100(3.17)	-
Van Zanten(1986)	790~1580(25.1~50.1)	1.5~3.5
Holtz et al.(1989)	100~150(3.17~4.76)	3.0~5.0
Lawrence and Koerner(1988)	150(4.76)	-
Koda et al.(1984)	100(3.17)	0.5
de Jager and Oostveen(1990)	315~1580(9.99~150.1)	1.5~3.0
Bergado et al.(1996)	495(15.8)	Max. in site
비 고	Q _w 치의 () 속은 cm ³ /sec 단위임	

표 4. 요구 통수능력 산정을 위한 배수재 폭과 두께

	성곽형	하모니카형	파이버형
폭(mm)	100	95	85
두께(mm)	4	3.5	11

표 5. 요구 통수능력과 실험 통수능력의 비교

유량(cm ³ /sec)	종 류	성곽형	하모니카형	파이버형
	실험 통수능력(최소값) (조건 : 절곡, 측압 4kgf/cm ² , 동수경사 0.5)		9.00	11.80
요구 통수능력(최대값) (조건 : 압밀도10%, Hansbo의 등가직경)		8.74	8.96	8.64

상기와 같은 조건으로 각 재료별 요구 통수능력 계산값과 실험으로부터 측정된 통수능력을 비교한 것이 표 5이다. Phadhan등(1991)은 점토지반인 경우 압밀 전 과정에 있어서 통수능력이 요구통수능력보다 크면 웰저항의 영향은 무시하여도 무방하다고 했다. 따라서 표 5의 결과에 의하면 본 연구에서 적용한 성곽형과 하모니카형은 계산된 요구 통수량이 압밀 전 과정에서 통수능력, 즉 실험에서 측정된 통수능력 보다 작으므로 웰저항을 무시하여도 무방하고 요구되는 지반조건에서 무리 없이 간극수를 소산시킬 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 파이버형의 경우는 실험에 의한 통수능력이 요구 통수능력보다 작기 때문에 요구되는 지반조건에는 적합하지 않지만

현장에서 적용 가능한 연직배수재의 요구 통수능력 기준치는 표 3에서 제시하고 있는 최소조건(측압 0.15~3.5kgf/cm²의 조건에서 통수능 0.32~50m³/sec)의 범위에는 만족하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 통수능력 저감 요인에 영향을 미치는 주된 인자인 측방토압, 동수경사, 변형 요인 등의 관계를 파악하기 위해 고무 멤브레인 안에 점토를 채운 뒤 하모니카형, 성곽형, 파이버형의 3가지 연직배수재를 설치하여 통수능력 실험을 실시하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일 동수경사에서 시간의 경과에 따른 통수량의 변화는 측압이 클수록 초기부분에 서만 통수량의 저하가 있고 이후로는 감소량의 변화가 매우 작았다.
2. 동수경사의 증가에 따라 통수량은 감소했으며 각 배수재별 평균 감소율의 크기는 성곽형, 하모니카형, 파이버형 순으로 나타났다.
3. 측압이 증가함에 따라 통수능력은 감소하며 통수능력의 감소는 동수경사에 의한 감소보다 측압에 의한 감소가 더 크게 나타났다.
4. 실험대상 배수재들의 최소 통수량 실험 결과는 $4.50 \sim 11.80 \text{cm}^3/\text{sec}$ 로 기 제안된 학자들의 요구 통수능력의 범위인 $0.32 \sim 50 \text{cm}^3/\text{sec}$ 에 속하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김영남, 이강일(1996), “연직배수공법”, 한국지반공학회 연약지반처리 위원회 현지세미나, pp.1 ~ 19.
2. 박영목(1996), “현장조건을 고려한 플라스틱 보드 드레인인의 성능평가” 96 Geosynthetics Conference, Seoul, Korea, pp.89 ~ 100.
3. 박종두(2000), “연직배수재의 통수능에 관한 연구”, 서울시립대학교 대학원 석사학위논문.
4. Bergado, D.T., Manivannan, R., and Balasubramaniam, A.S.(1996), “Proposed Criteria for Discharge Capacity of Prefabricated Vertical Drains”, Geotextiles and Geomembranes, Vol.14, No.9, pp.481 ~ 505.
5. Chan Kee Kim, Young Su Chae, Young Nam Kim, Kang Il Lee, Tae Hoon Kim(2004), “Experimental Study on the Characteristics of Discharge Capacity of Vertical Drains”, GeoAsia 2004 Proceeding of the 3th Asian Regional Conference on Geosynthetics, International Geosynthetics Society, pp.1081 ~ 1087.
6. Hansbo, S.(1979), “Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains”, Ground Engineering, Vol.12, No.5, pp.21 ~ 25.
7. Kamon, M., Pradhan, T.B.S.(1992), “Laboratory Evaluation of the Discharge Capacity of Prefabricated Band Shaped Drains”, The Society of Materials Science, Japan.
8. Kjellman, W.(1948), Discussion, “Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells”, Transaction ASCE, Vol.113, pp.748 ~ 751.
9. Kramer, 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”, Proceedings of 12th ICSMFE, Rio, De, Janeiro, pp.1377 ~ 1380.
10. Rixner, J. J., Kramer, S. R., and Smith, A. D.(1986), “Prefabricated Vertical Drain”, FWHA/RD-86/168, Fedral Higway Administration, Washington, D.C., Vol.1.
11. Van Zanten, R. V.(1986), “The Guarantee of the Quality of Vertical Drainage Systems”.