

영향인자를 고려한 연직배수재의 통수능 평가

Estimation on Discharge Capacity of Prefabricated Vertical Drains Considering Influence Factors

신 은 철¹ Shin, Eun-Chul
박 정 준² Park, Jeong-Jun
김 중 인³ Kim, Jong-In

Abstract

The prefabricated vertical drains (PVDs) are one of the most widely used techniques to accelerate the consolidation of soft clay deposits and dredged soil. Discharge capacity is one of the factors affecting the behavior of PVDs. In the field, a PVD is confined by clay or dredged soil, which is normally remolded during PVD installation. Under field conditions, soil particles may enter the PVD drainage channels, and the consolidation settlement of the improved subsoil may cause folding of the PVD. These factors will affect the discharge capacity of the PVDs. In this study an experimental study was carried out to estimate the discharge capacity of three different types of PVDs by utilizing the large-scale laboratory model testing and small-scale laboratory model testing equipments. The several factors such as confinement condition (confined by soft marine clay or dredged soil) and variations of the discharge capacity were studied with time under soil specimen confinement. The test results indicated that discharge capacity decreases with increasing load, time, and hydraulic gradient. With load application, the cross-sectional area of the drainage channel of PVD decreases because the filter of PVD is pressed into the core. The discharge capacity of the soft marine clay-confined PVDs is much lower than that of the dredged soil-confined PVDs.

요 지

연직배수공법은 연약지반과 준설패립지반의 압밀을 촉진시키고, 강도를 증진시키는데 가장 널리 사용되는 공법중의 하나이다. 토목섬유로 제작된 연직배수재(PVD)를 활용하여 지지력이 부족한 지반을 개량하는 경우, 배수재의 통수능력이 매우 중요한 요인으로 작용한다. 일반적으로 통수능력 실험은 고무 멤브레인으로 구속압력을 가하여 행해지고 있으나, 이는 현장에서 발생할 수 있는 여러 통수능력 저하 영향인자를 충분히 반영하지 못하고 있는 실정이다. 현장조건에서 연직배수재는 해성점토나 실트질 사질토에 의해서 구속되어 배수재가 휘어지거나, 접히거나 하여 배수성능이 저하되기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 연직배수재를 활용하여 연약지반을 개량할 경우 현장조건을 고려한 통수능력을 평가하기 위하여 소형 통수능력 실험장치와 대형 통수능력 실험장치를 이용하여 배수재, 토사종류 및 축압, 상재하중, 동수경사의 실험조건을 설정하여, 연직배수재의 종방향 통수능력 실험을 수행하였다. 분석 결과, 배수재 종류에 따른 통수능력은 포켓식 배수재가 접착식에 비하여 크게 도출되었다. 토사종류에 따른 통수능력은 점토보다 준설토지반에서 더 크며, 하중과 동수경사, 가압시간의 증가에 따라 통수능력이 감소하는 것으로 나타났다. 포켓식 배수재가 점토지반에 타입되었을 경우, 하모니카형 코어를 가진 배수재가 요철형보다 통수능력이 크며, 준설토 지반에 타입된 경우에는 초기 배수면적비와 통수능력비가 거의 비례하는 것으로 나타났다.

Keywords : Discharge capacity, Dredged soil, Hydraulic gradient, Large-scale model test, Marine clay, PVDs

1 정희원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Envir. System Engrg., Univ. of Incheon, eashin@incheon.ac.kr)

2 정희원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정 수료 (Member, Ph. D Candidate, Dept. of Civil & Envir. System Engrg., Univ. of Incheon, frostjun@incheon.ac.kr)

3 정희원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정 수료 (Member, Ph. D Candidate, Dept. of Civil & Envir. System Engrg., Univ. of Incheon, jikim@incheon.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 우리나라에서는 대규모 공항, 공업단지, 신도시 건설, 고속도로 건설 등의 부지확보를 위하여, 국토가 좁고 얇은 해안을 가지고 있는 국가에서 주로 사용되고 있는 가장 경제적이고 효율적인 해안준설매립 방법을 이용해 왔다. 그러나 해안준설매립을 통하여 조성된 지반은 대부분이 해성점토, 실트질 사질토 등의 연약지반으로 구성되어 있어, 충분한 지지력을 확보할 수 있는 지반개량에 적합한 대책 공법이 요망된다. 대규모 해안매립 지반의 조기 침하와 강도증진을 위하여 다양한 종류의 지반개량 공법이 적용되며, 최근 들어 플라스틱 코어를 지오텍스타일로 감싼 밴드형태의 기성연직배수재(PVDs)가 널리 사용되어 오고 있다. 이와 같이, 토목섬유로 제작된 연직배수재를 활용하여 대심도 지반개량 및 실트질 지반과 같이 투수성이 큰 연약지반을 개량하는 경우, 배수재의 통수능력 확보가 매우 중요하다. 연직배수재의 통수능에 관하여 많은 연구자들이 제안한 값은 차이가 너무 크기 때문에 실무에 적용하기가 어려워 통수능에 주요하게 영향을 미치는 요소를 고려하여 쉽게 결정할 수 있는 기초의 정립이 필요하다(김상규, 2001). 일반적으로 배수재의 통수능력 실험은 고무 멤브레인으로 배수재를 구속하여 행해지고 있으나, 이러한 실험은 현장에서 발생할 수 있는 여러 통수능력 저하 영향인자를 반영하지 못한다. 즉, 현장조건에서 연직배수재는 해성점토나 실트질 사질토에 의해서 구속되어져 있으며, 이로 인해 필터구멍 막힘현상이 발생하며, 지반의 압밀침하로 인해 휘어지거나(bending), 접히거나(folding) 하여 이로 인해 배수능력이 저하된다(박영목, 1996).

따라서, 본 연구에서는 현장조건을 고려한 실내 통수능 실험을 실시하여, 배수재의 종류, 토사종류, 하중조건 및 동수경사에 따른 통수능력을 비교, 평가하였다.

2. 연직배수재의 통수능 영향인자

연직배수재의 통수능력은 축압에 의해서 필터가 코어 속으로 밀려들어가 배수재의 유로단면적이 줄어드는 크리프 현상, 타입시 맨드렐에 의해 발생하는 주변지반의 교란효과(smear effect), 배수재내의 간극수가 흐르는데 저항하는 현상인 배수저항(well resistance), 지반 내에서 세립자들이 필터를 막는 막힘현상(clogging)이 있다. 또한 지반침하로 인한 배수재의 변형, 장기간에 걸친 물리적 및 화학적 현상으로 나타나는 열화, 배수재내에 누적된 공기의 영향 등 여러

가지 요인으로 인하여 연직배수재의 유로단면적이 변화하게 된다. 연직배수재의 통수특성에 관하여 배수재의 변형 및 구속압에 의한 통수능력 저하에 대한 연구가 이루어졌다(Holtz 등, 1989; Bergado 등, 1991). 또한, 장연수(2003)는 압밀에 따른 배수재의 자유변형, 강제절곡변형 등의 조건에서 구속압과 동수경사, 경과시간에 따른 통수능의 변화에 대하여 연구를 수행하였다. 이들 중 본 연구와 관련된 몇 가지에 대해 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

2.1 지반 내 축압에 의한 크리프의 영향

지반 내에 타설된 연직배수재의 통수능력에 큰 영향을 미치는 요인으로 토압을 들 수 있다. 현장에 타설된 배수재는 타설 직후에는 직선형태를 유지하지만 지반의 압밀이 진행되면서 변형이 발생하게 된다. 지반 내에 타설된 배수재는 주위의 축방토압에 의해 필터가 코어 내부로 휘어져 들어와 유로단면적이 감소됨으로서 통수능력이 저하된다. 이러한 영향은 배수재의 구조상 코어와 필터의 형태 및 종류에 따라 달라진다.

2.2 배수재 변형의 영향

맨드렐을 이용하여 현장에 타설된 연직배수재는 지반이 압밀되는 동안 지반과 함께 침하하게 되며, 이로 인하여 변형이 발생될 수 있다. 이러한 변형에는 휨, 꼬

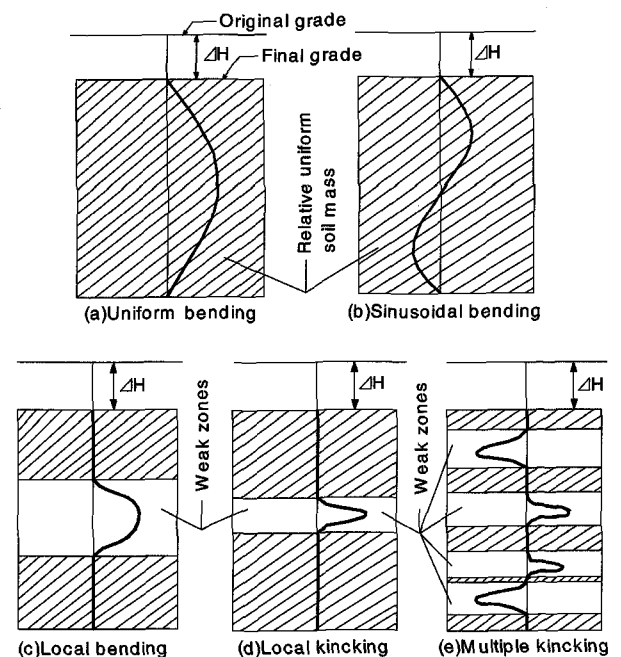


그림 1. 침하에 의한 연직배수재의 변형형태 (Lawrence and Koerner, 1988)

임, 접힘, 뒤틀림 등이 있으며, 이로 인하여 지반에 타설된 배수재의 성능은 크게 저하된다.

그림 1에서는 지반 침하로 인해 발생가능한 배수재의 여러 가지 변형형태를 보여주는 것으로 지반의 토질 종류가 균질한 경우와 토층과 토층사이에 압축성이 큰 연약지반이 존재하는 경우로 나타내었다. 이와 같이 연직배수재에 발생할 수 있는 변형의 정도는 지반의 성질에 따라 달라지며, 특히 유기질토, 이탄, 쓰레기 매립층 등과 같이 압축성이 매우 큰 연약지반에서는 과도한 변형이 일어나 배수재가 찢어져 그 기능이 저하하는 경우도 발생한다.

2.3 배수저항과 교란효과의 영향

지반 내에서 측방토압에 의한 코어 내 흐름통로의 체적감소와 침하에 따른 배수재의 변형 및 굴곡, 배수재 내구성에 따른 재료성능감소 등 여러 가지 요인에 의한 영향을 받는다. 이러한 요인으로 인한 통수능력의 감소를 통틀어 배수저항으로 정의한다.

맨드렐은 배수재를 지반 내에 타입할 경우 배수재를 보호하고, 주변 흙을 강제로 밀어냄으로서 배수재가 타입될 공간을 확보하는 역할을 한다. 따라서, 맨드렐의 타입은 주변토층의 전단변형과 변위를 유발시키며, 이러한 전단현상이 발생하면서 지반의 전응력과 간극수압은 증가하게 된다. 따라서, 주변 흙은 교란되고 이렇게 교란된 부분을 맨드렐에 의한 교란 영역 즉 스미어존으로 구분하고 있다. 이러한 교란영역의 대부분은 맨드렐의 크기와 형상, 지반의 종류와 타입방식 등에 따라 달라진다.

연직배수재의 스미어존 범위에 관하여 Hansbo(1979, 1986)는 스미어존의 직경은 맨드렐 직경의 2배로 산정하는 방법을 제안한 바 있다. 특히, Bergado, et al. (1991)와 Long, et al.(1994)은 연약한 점토에 대하여 스미어존의 영향을 파악하기 위하여 실내 및 현장실험을 실시하고, 스미어존의 수평투수계수는 대상점토의 연직투수계수와 같게 되고 스미어존의 범위가 맨드렐 직경의 2배에 해당한다는 연구결과를 보고하고 있다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 소형통수능력 실험

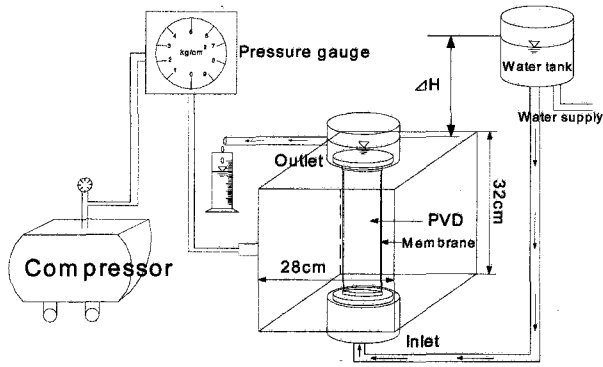
본 연구에서는 소형통수능력 실험을 통하여 연약지

반 내에 연직배수재가 타설되었을 때, 지반 내에서 발생하는 측압하에서의 통수능력을 평가하고자 그림 2(a)와 같은 소형 통수능력 실험장치를 제작하였다(신은철 등, 2001). 본 실험장치는 가로 28cm, 세로 32cm인 사각형 강관 내에 배수재 양단을 실험기의 상하부에 고정시키고, 그 외부를 두께 0.3mm의 멤브레인으로 피복함으로써 종방향만의 흐름만 허용한 후, 강관 내부에 콤프레서를 이용하여 공기압을 가하여 배수재가 지반 내에서 측압을 받는 상태를 나타낸 것이다. 물은 하부에서 상부로 흐르게 하였으며, 이때 물의 흐름은 유입 및 유출 수조의 수두차로서 조절하였다. 그 후 표 1과 같은 실험조건에 대하여 단위시간당의 통수량을 측정하였다. 즉, 본 실험에서는 3 종류의 연직배수재를 가지고 측압의 변화와 동수경사 조건에 따른 통수능력의 변화를 고찰하였다.

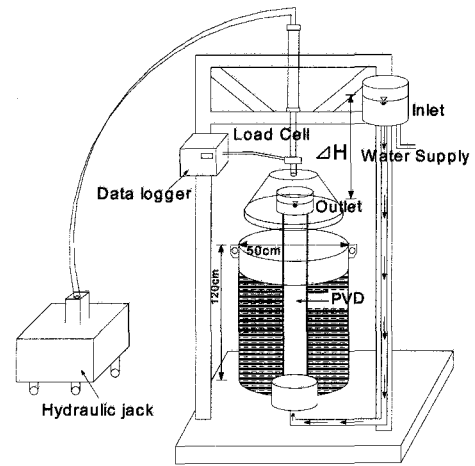
통수능력실험은 실험기 내에 길이 32cm의 배수재를 0.3mm의 고무멤브레인으로 구속한 상태로 설치한 후, 강관의 본체와 덮개를 결합하였다. 유입수조의 높이를 조절하여 조건에 해당하는 동수경사로 고정하고, 콤프레서를 이용하여 실험 조건에 해당하는 측압을 가하였다. 유입 및 유출 수조의 수두차가 일정해진 후에 유출 수조로 나온 물을 1분간 메스실린더로 받아서 통수량을 측정하였다. 한 하중단계의 실험이 완료되면 배수재를 교체한 후 상기 과정을 반복하여 측압과 동수경사, 배수재를 변화시켜가면서 통수능력을 측정하였다.

3.2 대형통수능력 실험

대형통수능력 실험은 연직배수재가 연약지반내에 타설된 후, 현장에서 상부토층에 의하여 가해지는 상재하중 하에서 통수능력을 평가하기 위하여, 하중재하에 따른 대형통수능력 실험을 실시하였다. 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 모형지반 조성은 직경 50cm, 높이 120cm인 원통형 강관 내에 배수재를 하단부에 고정시키고 강관 내에 토사시료를 채운 후, 하중재하장치로 하중을 가하여 연직배수재가 모형지반과 함께 거동하도록 하였다. 관로의 유입부는 하부에 연결되고, 유출부는 상부에 연결됨으로서 물이 하부에서 상부로 흐르게 하였다. 이때 물의 흐름은 유입 및 유출 수조의 수두차로서 조절하였다. 그 후 표 1과 같은 실험조건에 대하여 단위시간당의 통수량을 측정하였다. 또한, 표 2에 나타낸 바와 같이 각각의 연직배수재에 대한 공학적 특성을 나타내었고, 각기 다른 배수재에 대하여 실제 지반에서의 상재하중



(a) 소형통수능력 실험장치



(b) 대형통수능력 실험장치

그림 2. 실험에 사용된 통수능력 실험장치

표 1. 통수능력 실험의 항목 및 조건

실험항목	실험조건	
	소형 통수능력실험	대형 통수능력실험
측압 및 하중조건	50, 100, 200kPa	2, 10, 20, 30, 40kN
동수경사	0.1, 0.2, 0.5, 1.0	

표 2. 연직배수재의 공학적 특성

종류	재질	특징	폭(mm) 두께(mm)	인장강도 (kg/전폭)
A	core poly propylene	하모니카형 코아, 포켓식	100±0.5 4±0.5	350kg 이상
	filter poly propylene			70kg
B	core poly propylene	요철형코아, 포켓식	100±0.5 4±0.5	230kg 이상
	filter poly propylene			70kg
C	core poly ethylene	접착식	95±2 2.6±0.5	175.2kg
	filter Viscose ethylene			4.0kg

변화와 동수경사 조건에 따른 통수능력의 변화를 측정하였다.

통수능력실험은 실험기 내에 길이 110cm의 배수재를 셀하단부에 고정시킨 후, 토사시료를 강관 내에 90cm까지 채워 넣고 하중재하판을 설치하였다. 토사시료 상부로의 유실을 막기 위하여 두께 3mm의 고무멤브레인을 하중재하판 위에 올려놓은 후, 토사시료의 안정화를 위하여 휴대용콘관입시험기에 의한 콘관입저항치 변화를 살펴본 결과, 24시간 이후 저항치의 변화가 없어 충분히 안정화가 이루어진 것으로 판단하고, 실험을 수행하

였다.

시간 경과 후 배수재를 하중재하장치 내에 있는 유출 수조와 연결하고, 유입부 수조의 높이를 조절하여 조건에 해당하는 동수경사로 고정시킨 후, 하중재하장치를 조절하여 조건에 해당하는 상재하중을 가하였다. 유입수조와 출입수조의 수두차가 일정해진 후에 유출 수조로 나온 물을 1분간 메스실린더로 받아서 통수량을 측정하였다. 동일조건에서의 통수량은 5회씩 측정하여 평균치를 이용하였다. 한 하중단계의 실험이 완료되면 다음 단계의 하중을 가하여 통수능력을 측정하였다.

3.3 대상시료의 지반공학적 특성

두 가지 시료의 지반공학적 특성을 파악하기 위하여 자연함수비시험, 입도분포시험 등의 물성시험을 실시하였다. 통수능력 실험에 사용된 해성점토의 자연함수비는 32%, 비중은 2.73으로 나타났다. 또한, 액성한계(LL)는 27.3%, 소성한계(PL)는 18.3%를 나타냈고, 통일분류법에 의하여 CL로 판명되었다. 준설토는 송도매립현장에서 채취한 시료로 준설패류후 수개월동안 침강시키면서 상부의 여수를 호안에 설치된 여수토를 통하여 배출시킬 경우 상부 여수에 침강된 준설토로서 자연함수비 시험 결과 23.5%, 비중은 2.64로 나타났고, 통일분류법에 의하여 SM으로 나타났다. 흙시료의 공학적 특성은 표 3에 나타내었고, 입도분포곡선은 그림 3과 같다.

표 3. 흙시료의 지반공학학적 특성

특성	흙의 종류	점토	준설토
자연함수비(w_n , %)		32	26
비 중(G_s)		2.73	2.64
액성한계(LL, %)		27.73	-
소성한계(PL, %)		18.30	-
통일분류법(USCS)		CL	SM
다짐 특성	γ_{dmax} (kN/m^3)	17.5	15.8
	w_{opt} (%)	17.5	8.6

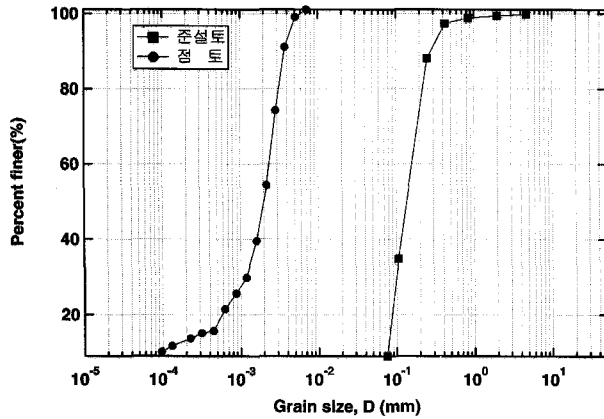


그림 3. 흙시료의 입도분포 곡선

4. 실험결과 및 분석

4.1 소형통수능력 실험결과

4.1.1 측압의 영향

측압에 따른 토목섬유 연직배수재의 통수능력, Q_w 를 검토하기 위하여 측압의 변화를 주어 수행한 실험결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 3 종류의 배수재 모두 측압이 증가할수록 Q_w 가 감소하는

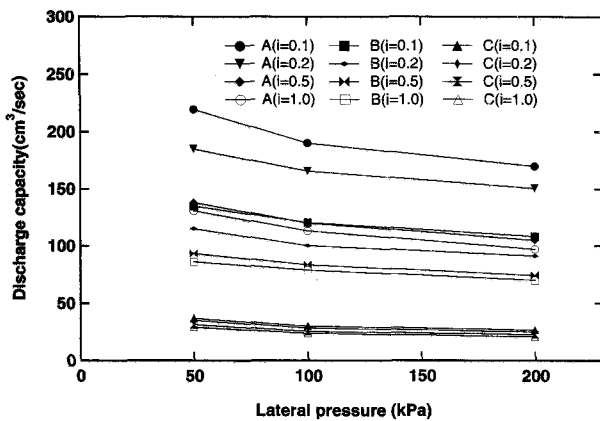


그림 4. 측압에 따른 통수능력 변화

경향을 나타내고 있다. 측압에 따라 Q_w 가 감소하는 것은 배수재가 측압을 받을 때 필터가 코어 틈속으로 끼어 들어 유로 단면적이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 배수재 A의 Q_w 는 배수재 B 보다 대략 1.5배 크게 나타났고, 배수재 C 보다는 대략 5.5배 정도 통수능력이 큰 것으로 나타났다. 그 이유는 배수재 A가 B와 C보다 배수단면적이 크고, 필터를 지지하는 효과가 크기 때문인 것으로 사료된다. 배수재 C가 A와 B에 비해 통수능력이 작게 나온 것은 필터와 코어가 열융합에 의해 서로 접착되어 있어 측압을 받을 경우 코어내로 필터가 밀려들어가는 경향이 크며, 필터부의 영구변형이 크기 때문인 것으로 판단된다.

4.1.2 동수경사의 영향

배수재가 지반 내에 타입되었을 때 현장에서의 동수경사는 시간과 토질조건, 상재하중, 시공방법 등에 따라 다르기 때문에 단일의 동수경사를 규정하기가 어렵다. 따라서 동수경사를 여러 조건으로 변화시켜가며 동수경사에 따른 통수능력에 대한 실험결과를 그림 5에 나타내었다. 일반적으로 배수재의 통수능력 실험에서 Darcy의 법칙이 유효하다고 하면, 통수능력은 동수경사에 대하여 정규화된 값이므로 동수경사의 변화와 무관하게 일정한 값을 보여주어야 한다.

그러나 실험결과에서 나타난 바와 같이 동일한 측압 조건에서 동수경사가 커질수록 Q_w 는 감소하는 경향을 나타낸다. 이중 Q_w 가 가장 큰 배수재 A의 경우는 동수경사의 증가에 따른 Q_w 의 감소경향이 크며, Q_w 가 가장 작은 배수재 C의 경우는 동수경사에 대하여 Q_w 의 감소가 미소하게 나타났다. 동수경사에 따른 통수능력의 감소를 동수경사가 0.1~0.5, 0.5~1.0의 두 부분으로 나누

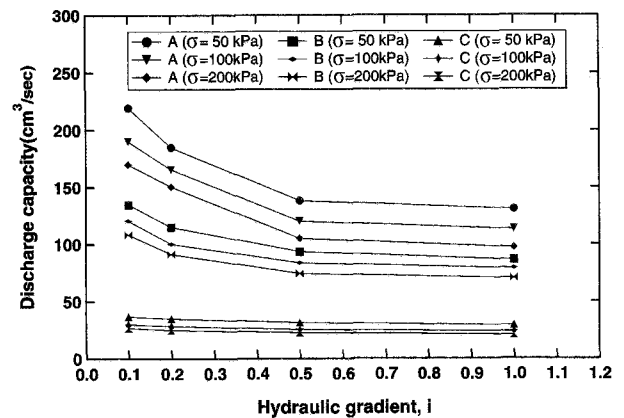


그림 5. 동수경사에 따른 통수능력 변화

어 보았을 때, 0.1~0.5사이에서의 통수능력의 감소는 크게 나타났으며, 0.5~1.0사이에서는 거의 직선적 거동을 하는 것으로 나타났다.

동수경사가 증가함에 따라 통수능력이 감소하는 것은 배수재 내부의 흐름상태가 동수경사가 증가함에 따라 흐름자체가 불안정해져서 동수경사가 증가하는 만큼 통수능력이 비례하여 증가하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

4.1.3 초기배수면적에 따른 영향

측압과 동수경사를 변화시켜서 실시한 소형통수능력 실험에서 얻은 통수능력을 가지고 연직배수재의 초기 배수면적에 따른 통수능력비를 알아보기 위하여 다음과 같은 분석을 실시하였다.

그림 6은 초기배수면적비에 따른 통수능력비를 나타낸 그래프로서, X축은 배수재 C의 초기배수면적을 기준으로하여 배수재 A와 B의 초기배수면적을 나누어 초기배수면적비로 나타내었고, Y축은 배수재 C의 통수능력을 기준으로 하여 배수재 A와 B의 통수능력을 나누어 통수능력비로 나타내었다.

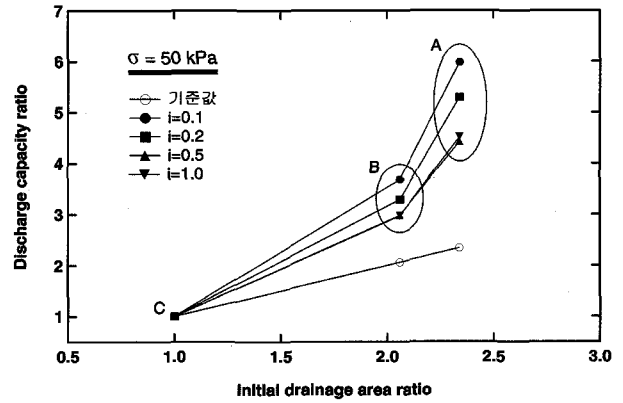
배수재 A, B, C의 초기 배수면적비는 2.34, 2.06, 1이며, 각각의 측압에 따른 통수능력비는 표 4에 나타내었다. 즉, 배수재 A의 통수능력비가 배수재 B의 통수능력비 보다 크게 나타났으며, 배수재 A의 배수재 C에 대한 통수능력 증가비가 배수재 B의 배수재 C에 대한 통수능력 증가비 보다 커서 AB의 기울기가 BC의 기울기보다 더 크게 나타났다.

4.2 대형통수능력 실험결과

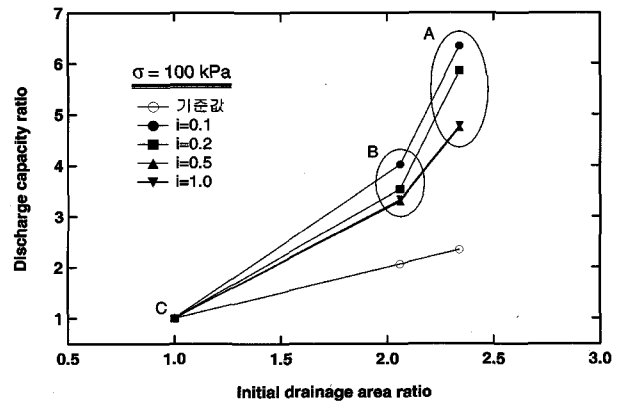
현장에서 채취한 준설토와 해성점토를 이용하여 각기 상재하중이 2, 10, 20, 30, 40kN 조건하에서 동수구배를 4단계로 변화($i=0.1, 0.2, 0.5, 1.0$)시켜가며 실험을 실시하였다. 각각의 상재하중을 단위중량이 20kN/m^3 인 성토재를 사용한다는 가정하에 성토높이로 환산하였다. 또한, 실험에 사용된 토사시료에 대해 Boussinesq의 해법을 사용하여 원형등분포 하중에 의한 중심하부에서의 수직응력을 구하고, 이를 정지토압계수를 사용하여 측압으로 나타내었다.

4.2.1 상재하중의 영향

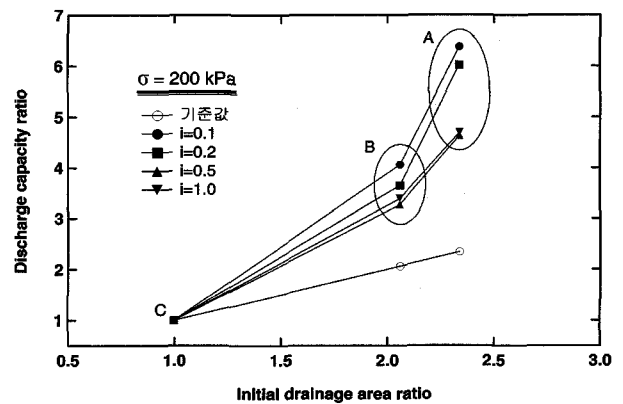
현장조건에서 토사종류에 따른 배수재의 상재하중에



(a) $\sigma = 50\text{ kPa}$



(b) $\sigma = 100\text{ kPa}$



(c) $\sigma = 200\text{ kPa}$

그림 6. 초기배수면적비에 따른 통수능력비

표 4. 측압에 따른 통수능력비(소형통수능 실험)

배수재	측압(σ)		
	50 kPa	100 kPa	200 kPa
A	4.51~5.98	4.77~6.34	4.69~6.37
B	2.97~3.68	3.33~4.02	3.39~4.06
C	1	1	1

다른 통수능력의 변화와 감소율을 알아보기 위하여 상재하중에 따라 각각의 토사에 대해 그림 7에 나타내었다. 즉, 상재하중이 증가함에 따라 배수재의 통수능력이

감소함을 나타내었다. 상재하중에 따라 통수능력이 감소하는 것은 상재하중에 따른 축압증가에 의해 배수재의 필터가 코어 틈속으로 끼어들어 유로 단면적이 감소하기 때문이다. 또한, 3종류의 배수재 모두 점토보다 준설토에서의 통수능력이 크게 나타났다. 이는 점토에서의 축압전달로 인하여 배수재 내부의 유로단면적의 감소가 준설토에서의 유로단면적 감소보다 크게 나타난 결과로 사료된다.

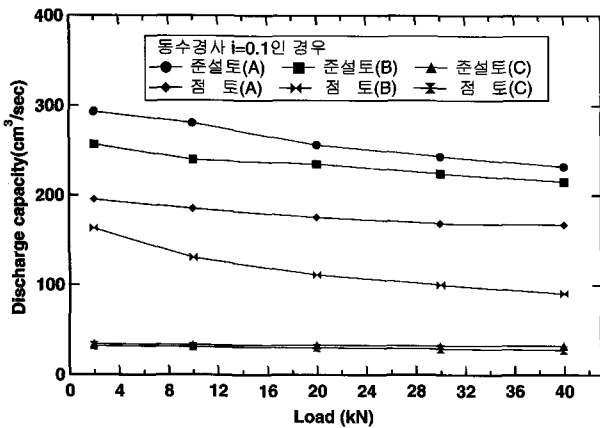
즉, 점토의 입도분포 곡선에서와 같이 세립질로 이루어진 점토의 입자특성과 필터의 유효구멍크기 특성상 막힘현상이 발생하여서 점토에서의 통수능력이 더 작게 나온 것으로 사료된다. 또한 포켓식인 배수재 A와 B가 접착식인 배수재 C보다 월등히 높은 통수능력을 나타내었다. 이는 접착식인 배수재 C의 초기배수면적이 포켓식에 비하여 작고 또한 축압을 받을 경우 코어내의 골속으로 필터가 밀려들어가는 경향이 크며, 필터부의 영구변형이 크기 때문에 낮은 통수능력을 나타낸 것으로 사료된다. 따라서 지반개량 대상지반의 특성을 정확

히 파악하고, 시공을 합리적으로 실시할 경우 그림 7과 그림 8에 제시된 결과를 바탕으로 접착식 배수재보다 포켓식 배수재를 연약지반개량 현장에 적용하면 효과적으로 기능을 수행할 것으로 사료된다.

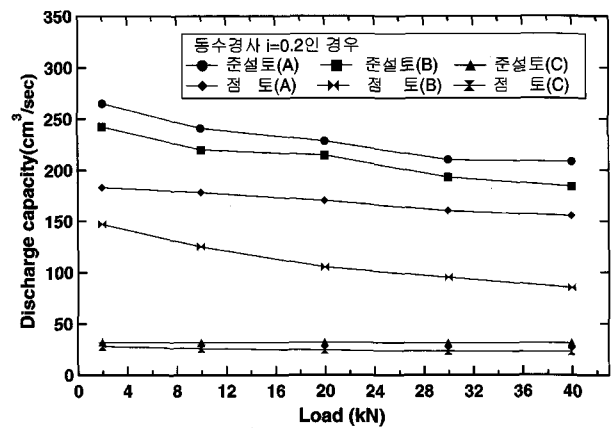
4.2.2 동수경사의 영향

동수경사를 여러조건으로 변화시켜가며 배수재의 통수능력을 검토하기 위하여 점토와 준설토에서의 동수경사의 변화를 주어 실험을 실시하였다.

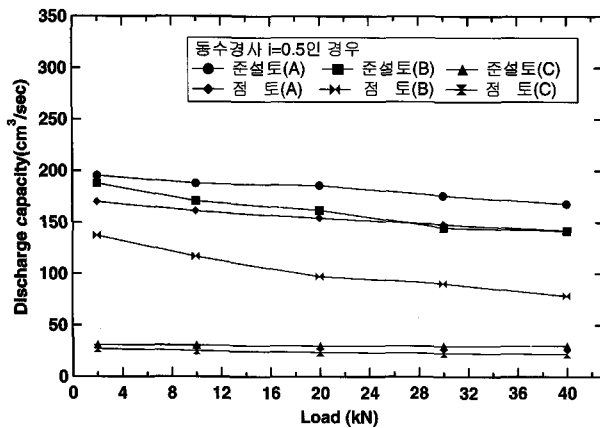
그림 8에 나타낸 바와 같이 동수경사에 따른 배수재의 통수능력은 종류에 따라 다소 차이는 있으나 동수경사가 증가함에 따라 통수능력이 감소하는 경향을 나타낸다. 준설토에 타입된 배수재가 점토에 타입되었을 때보다 동수경사의 증가에 따른 통수능력의 감소가 크게 나타났으며, 이중 통수능력이 높은 준설토에 타입된 배수재 A와 B인 경우에는 통수능력의 감소경향이 뚜렷하며 통수능력이 낮은 배수재 C의 경우에는 동수경사에 대하여 미소하게 감소함을 나타낸다. 이는 동수경사가



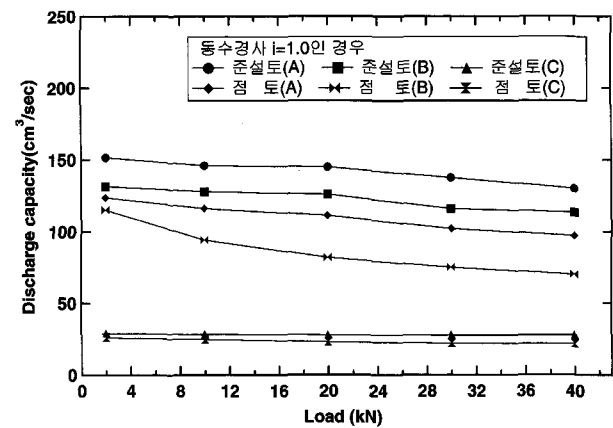
(a) 동수경사가 0.1일 때



(b) 동수경사가 0.2일 때

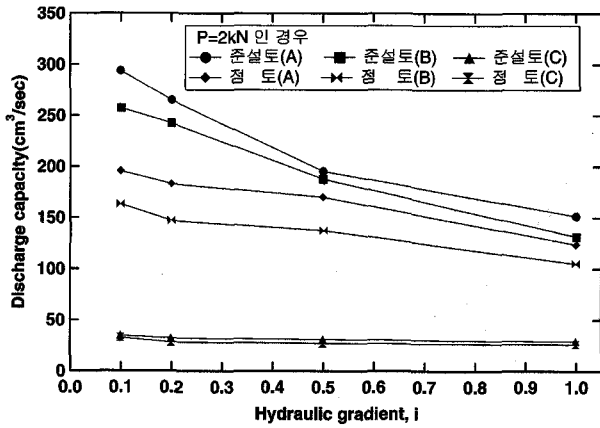


(c) 동수경사가 0.5일 때

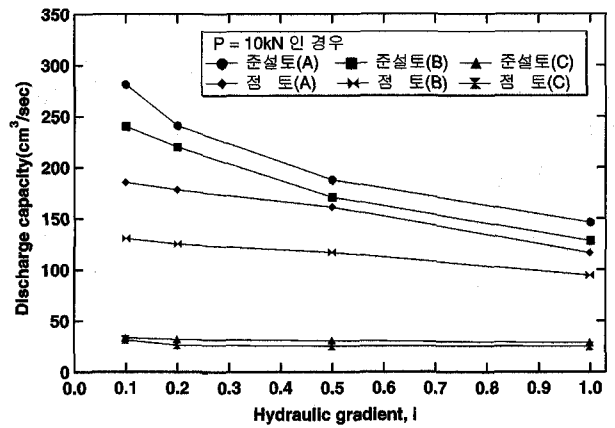


(d) 동수경사가 1.0일 때

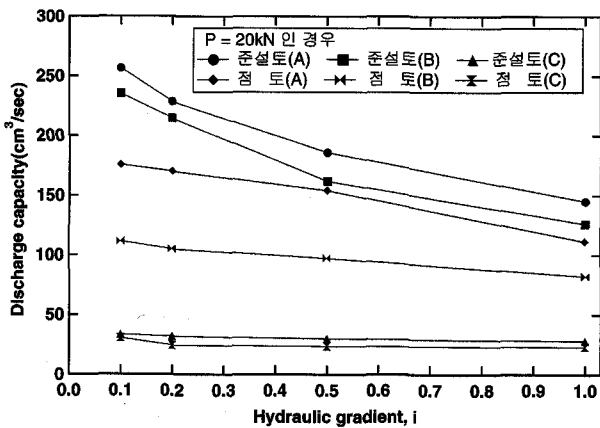
그림 7. 상재하중에 따른 통수능력



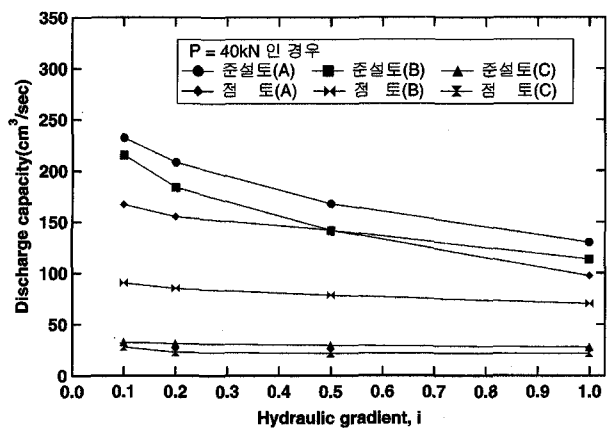
(a) 상재하중이 2kN일 때



(b) 상재하중이 10kN일 때



(c) 상재하중이 20kN일 때



(d) 상재하중이 40kN일 때

그림 8. 동수경사에 따른 통수능력

커지는 만큼 통수량이 비례하여 증가하지 못하기 때문으로 보인다. 즉 이것은 배수재 내에 발생하는 흐름의 종류에 따른 것으로 판단된다(Gabr, 1997).

4.2.3 초기배수면적에 따른 영향

그림 9와 그림 10은 각각 점토와 준설토에 타입된 배수재에 대하여 초기배수면적비에 따른 통수능력비를 나타낸 그래프로서, X축과 Y축의 기준은 4.1.3절에 나타난 바와 같이 배수재 C를 기준으로하여 초기배수면적비와 통수능력비를 나타낸 것이다.

배수재 A, B, C의 초기배수면적비는 2.34, 2.06, 1이

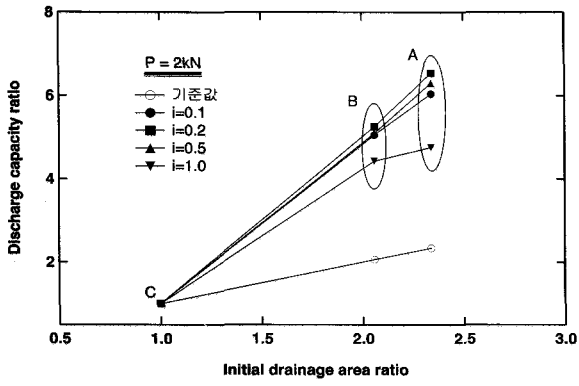
며 각기 하중에 따른 통수능력비는 표 5에 나타내었다.

준설토에 타입된 배수재 A와 B의 통수능력비가 점토에 타입된 배수재의 통수능력비 보다 더 크게 나타났다. 이는 점토에서의 측압전달로 인한 배수재 내부의 유로 단면적의 감소가 준설토에서 보다 크게 나타나며, 점토의 입도특성상 필터의 막힘현상이 발생하여서 준설토의 통수능력비가 더 크게 나온 것으로 사료된다.

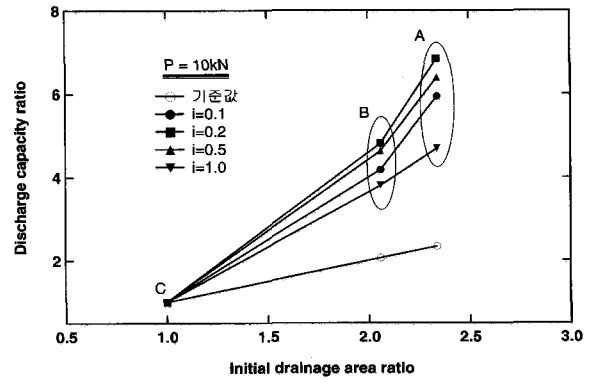
점토에 타입된 배수재의 통수능력비를 나타낸 그림 9에서는 배수재 A의 C에 대한 통수능력 증가비가 배수재 B의 C에 대한 통수능력 증가비보다 커서 AB의 기울기가 BC의 기울기 보다 더 크게 나타났다. 반면 준설토

표 5. 초기배수면적비에 따른 통수능력비(대형통수능력 실험)

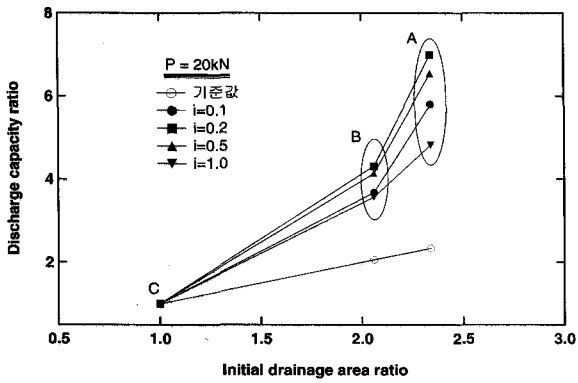
배수재	2kN		10kN		20kN		30kN		40kN	
	점토	준설토	점토	준설토	점토	준설토	점토	준설토	점토	준설토
A	4.76~6.54	5.22~8.51	4.69~6.85	5.16~8.44	4.83~7.00	5.20~7.72	4.64~6.84	4.96~7.47	4.47~6.83	4.69~7.14
B	4.04~5.25	4.53~7.53	3.80~4.81	4.52~7.21	3.57~4.32	4.52~7.08	3.41~4.06	4.19~6.88	3.23~3.74	4.10~6.62
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



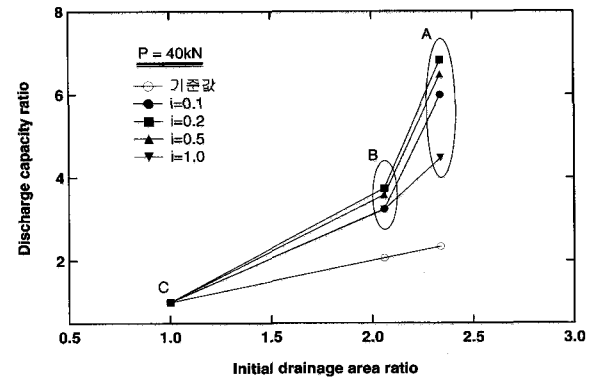
(a) 상재하중이 2kN일 경우



(b) 상재하중이 10kN일 경우

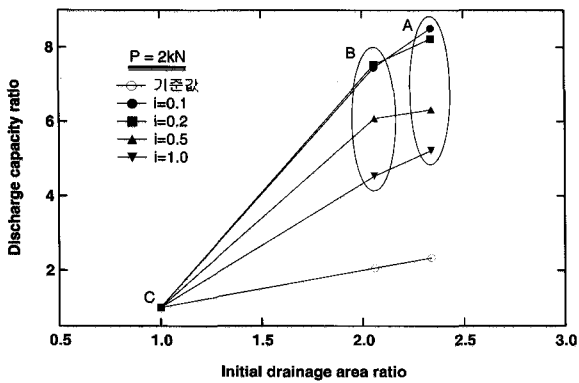


(c) 상재하중이 20kN일 경우

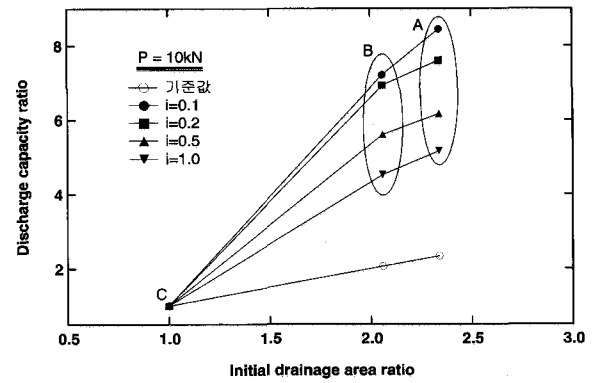


(d) 상재하중이 40kN일 경우

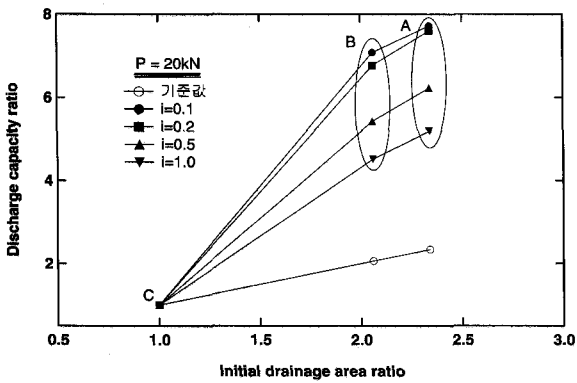
그림 9. 초기배수면적비에 따른 통수능력비(점도)



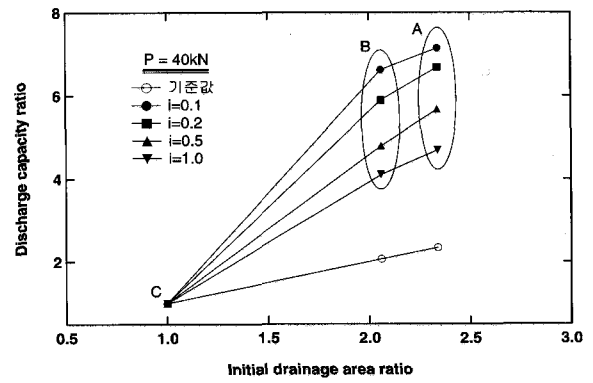
(a) 상재하중이 2kN일 경우



(b) 상재하중이 10kN일 경우



(c) 상재하중이 20kN일 경우



(d) 상재하중이 40kN일 경우

그림 10. 초기배수면적비에 따른 통수능력비(준설도)

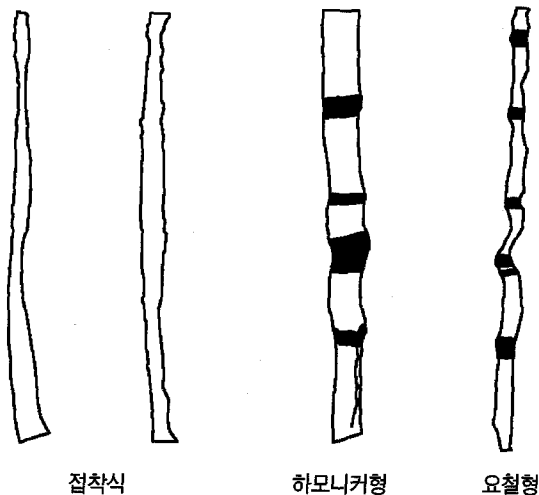


그림 11. 대형 통수능력 실험 후 연직배수재의 변형

에 타입된 배수재의 통수능력비를 나타낸 그림 10에서는 배수재 B의 C에 대한 통수능력 증가비가 배수재 A의 C에 대한 통수능력증가비 보다 커서 AB의 기울기가 BC의 기울기보다 더 작게 나타났다. 이는 배수재 A가 세립질로 구성된 점토에 타입된 경우 배수재 B보다 측압에 의한 유로단면적의 감소가 더 작은 것으로 판단되며, 반면에 준설토에 타입된 경우 배수재 A, B 모두 초기 단면적에 따라 통수능력이 비례하여 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 그림 11은 대형통수능력 실험 후 연직배수재의 변형을 모사하여 나타낸 것으로서 측방토압에 의해 필터가 코어내부로 휘어져 들어가 유로단면적이 감소됨을 나타내며, 특히 배수재 A, B가 접착식 배수재인 C보다 굴곡이 더 많이 발생한 것을 알 수 있다. 이는 코어의 특성상 포켓식 배수재인 A와 B가 유연성이 커서 이러한 현상이 발생한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 연직배수재를 활용하여 연약지반을 개량할 경우 현장조건을 고려한 통수능력을 평가하였다. 소형 통수능력 실험장치와 현장조건을 고려한 대형 통수능력 실험장치를 이용하여 연직배수재의 종류, 토사종류, 측압, 상재하중, 동수경사의 실험조건을 설정하여, 각각의 조건에 따른 종방향 통수능력 실험을 하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 토사종류에 따른 배수재의 통수능력은 점토보다 준

설토에 타입되었을 경우 더 크게 나타났으며, 이러한 결과는 점토의 입도특성상 필터의 막힘현상과 더불어 필터가 코어 속으로 밀려들어가 배수재의 유로단면적이 줄어드는 크리프현상이 상대적으로 크게 발생하여 준설토의 통수능력이 더 크게 나온 것으로 사료된다.

- (2) 배수재 종류에 따른 통수능력은 배수재 A와 B가 C에 비하여 크게 도출되었다. 이러한 결과는 배수재 A와 B가 유로단면적이 크며, 크리프현상 및 막힘현상, 지반침하로 인한 배수재의 변형 등 통수능 저하 요소에 영향을 작게 받는 것으로 판단된다. 즉, 이러한 영향인자들은 배수재의 구조와 재질, 코어의 배수면적, 필터의 강도와 유효구멍크기에 따라 좌우됨을 알 수 있었다.
- (3) 상재하중 및 동수경사에 따른 통수능력은 상재하중의 증가에 따른 측압의 증가와 동수경사의 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 동수경사의 증가에 따른 통수능력의 감소는 배수재 내에 흐르는 물의 흐름과 관계된 것으로 사료된다.
- (4) 배수재가 점토지반에 타입되었을 경우에는 하모니카형 코어를 가진 배수재 A와 요철형 코어를 가진 배수재 B의 초기 배수면적비는 1.14, 1인데 통수능력비는 대략 1.43, 1로서 배수재 A가 더 크게 나타났으며, 준설토 지반에 타입된 경우에는 초기 배수면적비와 통수능력비가 거의 비례하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 김상규, 김현태, 공길용 (2001), “연직배수재의 소요통수능 평가”, *한국지반공학회논문집*, 제17권, 제1호, 4월, pp.35-45.
2. 박영목 (1996), “현장조건을 고려한 플라스틱 보드 드레인의 성능평가”, *토목섬유학술발표회 논문집*, pp.91-99.
3. 신은철, 김남현, 강신 (2001), “실대형 모형실험을 통한 Plastic Board Drain의 통수능 분석”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp.1-4.
4. 장연수, 박정순, 박정용 (2003), “수평배수재의 불포화 통수특성 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제2호, 4월, pp.15-25.
5. Bergado, D. T., Hiroshi, A., Marolo C. A., and Balasubramaniam, A. S. (1991), “Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay”, *J. Geotech. Engrg.*, Oct, Vol.117, No.10, pp.1509-1530.
6. Gabr, M.A., Quaranta, J.D. (1997), “Prefabricated vertical drains in Geotechnical engineering: State of the art review”, *Proc. 7th International Offshore and Polar Engineering conference*, pp. 714-719.
7. Hansbo, S. (1979), “Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains”, *Ground Engineering*, Vol.12, No.5, pp.21-25.

8. Hansbo, S. (1986), *Preconsolidation of soft compressible soils by the use of prefabricated vertical drains*, Ann. des Travaux Pub. de Belgique, No.6, pp.553-562.
9. Holtz, R.D., Jamiolkowski, M., Lancellota, R. and Pedroni, S. (1989), "Behavior of Bent Prefabricated Vertical Drains", *Proc. of the 12th ICSMFE*, Vol.3, Rio de Janeiro, pp.1657-1660.
10. Lawrence, C.A. and Koerner, R.M. (1988), "Flow Behavior of Kinked Strip Drains", *Proc. Symposium of Geosynthetics for Soil Improvement*, ASCE Geotechnical Special Publication, No.18, pp.22-35.
11. Long, R., and Covo, A. (1994), "Equivalent diameter of vertical drains with an oblong cross section", *J. Geotech. Engrg.*, 120(9), pp.1625-1630.

(접수일자 2005. 2. 25, 심사완료일 2005. 11. 17)