

대심도 연약지반에 적용되는 PBD의 통수능에 관한 연구

A Study on Drainage Capacity of PBD Installed in Deep Soft Ground

변 요 셉¹ Byun, Yo-Seph

안 병 제² Ahn, Byung-Je

천 병 식³ Chun, Byung-Sik

Abstract

The problems of bearing capacity, settlement and shear deformation occur when constructing a structure such as harbor, airport and bridge on soft ground of marine clay, silty clay or sandy soil. Various ground improvement methods are applied to obtain preceding settlement of soft ground and strength increase. In this study, to analyze the applicability of PBD method in deep soft ground, the compound drainage capacity test was operated in comparison with SD. As a result of the test, a minimum drainage capacity of drain material was estimated to be more than 10 cm³/sec at a more than 400 kN/m² and less than 5 cm³/sec at a more than 500 kN/m² confining pressure in case of single core PBD. In case of double core PBD, it was estimated to be more than 10 cm³/sec at a more than 500 kN/m² confining pressure.

요 지

연약지반은 해성점토, 실트질, 사질토 등과 같은 지반으로 항만, 공항, 교량과 같은 구조물의 축조시 지지력 부족 및 침하, 전단변형 등의 문제점을 가진다. 이러한 문제점을 개선하고 연약지반의 조기 침하 및 강도증진을 위해 다양한 지반개량공법들이 적용되고 있으며 연약지반의 압밀에 소요되는 시간을 단축시키기 위해 연직배수공법이 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 대심도 연약지반에 적용될 PBD(Plastic Board Drain)공법에 대해 적용성을 분석하기 위해 SD(Sand Drain)와 비교하여 복합통수능실험을 실시하였다. 실험결과, 배수재의 최소통수능은 단일코어PBD의 경우 400kN/m²이상에서 10cm³/sec이상으로 측정되고 500kN/m²이상에서 5cm³/sec이하로 측정되며, 이중코어PBD의 경우 500kN/m²이상에서 10cm³/sec이상으로 측정되었다. 한편 500kN/m²이상에서 SD의 최소통수능은 0.4cm³/sec까지 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 이중코어 PBD를 사용하는 것이 대심도 연약지반개량을 위해 효과적임을 알 수 있었다.

Keywords : Compound drainage capacity test, Double core PBD, Double layered soft clay, Single core PBD

1. 서 론

양질의 천연모래를 배수재로 사용하는 샌드드레인(SD)공법은 연약점토지반의 압밀촉진공법으로써 가장

일반적으로 사용되고 있는 공법이다. 그러나 최근 국제적으로 대두되고 있는 환경보호문제로 인해 천연모래의 채취가 제한되고 있는 실정이다. 따라서 배수재로써 모래와 같은 자연재료를 대신 인공재료를 사용하는 압밀

1 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

3 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ. hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

촉진공법이 다수 제안되고 있다. 그 중에서도 플라스틱으로 제작된 다공질 배수재를 사용하는 플라스틱보드드레인공법(PBD공법)은 연약지반의 압밀촉진공법 중 유용한 공법중의 하나이다. PBD공법의 적용과 보급이 진행되어 오면서 그 적용성이나 유효성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 또한 그설계법이나 시공법의 개선도 이루어져 왔다. 그러나, PBD공법에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동은 그 메커니즘이 상당히 복잡하기 때문에 설계법 또한 복잡화되고 있으며, 실제의 현장에서는 설계법에 의해 예측된 소정의 개량효과를 얻을 수 없는 경우가 다수 보고되고 있는 실정이다(유승경, 2003).

PBD를 사용하는 연직배수공법은 Kjellman(1948)에 의해 판상으로 된 마분지를 연약지반 개량에 적용한 것이 효시로 알려져 있으며, 1960년대 이후 PBD의 유용성이 주목되어 현재까지 세계적으로 50여종의 PBD(Plastic Board Drain)가 개발되었다(Holtz 등, 1991). PBD 배수재의 통수특성은 현재까지 많은 연구에 의해 분석되었는데, Oosstveen 등(1990)은 셀안에 배수재를 설치하고 측압을 가하는 조건에서 배수재의 통수능력을 분석하는 실험을 제안하였다. 미국표준시험법(ASTM D4716-01)에서는 상하부판 사이에 banding이나 folding이 없는 배수재를 수평으로 설치하여 sealing하고, 하중을 가하여 원하는 응력으로 설정하여 임의의 동수경사 조건으로 외부 물의 높이를 조절한 후 배수재 내부로 물을 흘려보내면서 시간에 따른 통과유량을 측정하여 배수재의 통수능력을 분석하였다. Koener와 Lawrence(1988)도 Drexel이라는 시험기를 제작하여 미국표준시험법과 유사한 방법으로 시험을 수행하기도 하였다(유남재 등, 2008). 국내의 경우 PBD재를 이용한 연약지반공법이 최초로 적용된 것은 1975년 창원외곽의 적현단지이고, 그 후에 대불공단, 서천~군산간 고속도로를 비롯한 서·남해안의 연약지반 개량공법으로 많이 이용되고 있다. 최근의 연구에서 장용채 등(2004)은 연직배수재의 설치를 연직 및 수평방향으로 다양하게 변화시켜 수치해석을 수행함으로써 성토시 효율적인 연약지반개량 범위의 형태를 결정하도록 하였으며, 신은철 등(2005)이 자연상태의 연약지반이 아닌 주로 산업 활동 부산물인 폐석회로 구성된 지반의 개량시 연직배수재를 사용한 경우에 대한 연구를 수행하였다. 박영목(1996)은 직경 30cm, 높이 100cm의 강재(Steel)토조에 멤브레인으로 피복된 배수재를 설치하여 통수능력을 분석하였고, 강민수(1998)는 배수재를 셀 내에 설치하고 3mm두께의 고무멤브레인으로 피

복한 후 측압을 변화시켜 종방향 통수능력을 분석하였다. 박만규(2003)도 배수재와 멤브레인 사이에 시료를 넣어 측압 및 동수경사에 따른 여러 가지조건에서의 배수재 통수특성에 대한 실험을 수행하였다(유남재 등, 2008).

본 연구에서는 PBD 재료 중 대심도(40m이상) 지반개량에 적합한 배수재를 선정하고자 단일코아PBD와 이중코아PBD에 대하여 통수능 실험을 수행하고, 이를 샌드드레인(SD)공법과 비교분석하였다.

2. PBD 적용 현장조건 및 지반공학적 특성

2.1 현장조건

본 연구대상지역은 행정구역상 경상남도 진해시 안골동 인근 옥망산 전면 해역으로 한반도 남동 방향의 끝단에 위치해 있으며, 남해와 접하고 있어 조산운동에 의한 리아스식 해안이 발달하여 있으며, 남측으로는 가덕도, 송도, 연도 등의 크고 작은 섬들이 분포해 있는 퇴적기원이 다른 대심도 이층연약지반으로 구성되어 있다.

2.2 지반공학적 특성에 따른 상·하부층의 구분

본 현장의 해성 퇴적층은 상당 부분이 점토질 퇴적층으로 구성되어 있으나, 위치에 따라 해성 퇴적층 최하위와 중간부에는 모래질 퇴적층이 출현하기도 한다. 점토질 퇴적층은 지반공학적 관점에서 약 30m 지점에 수평적 연속성이 양호하고 비교적 얇은 두께로 산출되는 중간부의 모래질 퇴적층을 중심으로 상부 점토층과 하부 점토층으로 크게 구분된다. SPT N값으로써 점토의 연경도를 구분하면, 상부 점토층은 대체로 매우 연약(very soft)에서 보통 견고(medium stiff)한 범위를 보이는 반

표 1. 퇴적 특성 및 물리적, 역학적 특성에 따른 상·하부 점토층의 구분

구분	상부층	하부층
퇴적속도(cm/year)	0.3	1.35
포화단위중량(kN/m^3)	16.29	18.45
비중	2.725	2.731
초기간극비	1.674	1.019
소성한계(%)	29.0	22.8
액성한계(%)	68.8	43.5
소성지수(%)	39.2	20.8
압축지수	0.82	0.467
연직압밀계수(cm^2/sec)	6.07×10^{-4}	1.77×10^{-3}
연직투수계수(cm/sec)	6.01×10^{-8}	3.95×10^{-8}

면, 하부 점토층은 보통 견고(medium stiff)에서 매우 견고(very stiff)의 범위를 갖는다. 지역에 따라 중간부의 모래층이 존재하지 않고 상·하부 점토층이 직접 접하기도 한다. 퇴적 특성 및 물리적, 역학적 특성에 따른 상·하부 점토층의 구분은 표 1과 같이 나타내었다.

3. 실내모형실험

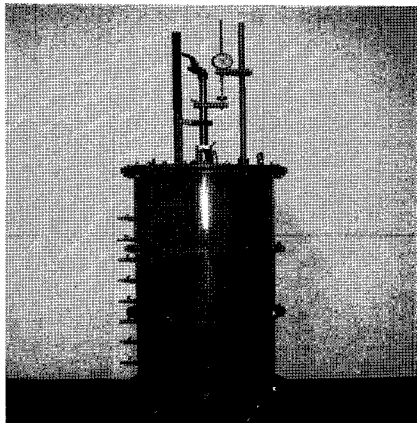
3.1 실험장치개요

본 연구에서는 그림 1에서 보는 바와 같이 복합 통수능 실험기를 제작하여 실내시험을 통해 배수재가 지중에 타설된 후 받는 일정 상재압력하에서의 통수능력을 파악하였다. 본 실험에 사용된 복합통수능실험기는 직경 50cm, 높이 105cm의 원통형 강재 프레임으로 제작되었으며, 실험의 편의상 3단으로 분리되도록 하였다. 실험기 측면에는 압밀진행에 따른 과잉간극수압 측정 포트를 10cm 간격으로 설치하였으며, 하부 바닥에는 배수재로부터 떨어

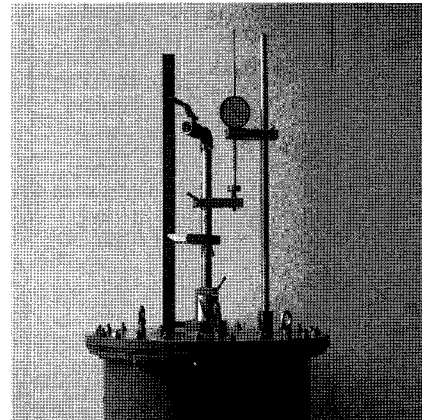
진 거리별로 과잉간극수압을 측정하고자 3개의 포트를 설치하여 압밀진행에 따른 과잉간극수압의 소산을 측정하였고, 측정된 과잉간극수압은 Digital Transducer를 통해 기록하였다. 동수경사(i) 조절을 위한 장치로 유출수조와 유입수조가 있으며, 유출수조에서 배수관로를 통해 유입된 물이 실험기 하부를 통해 배수재 내부로 유입되어 상부 배수관로를 통해 유입수조로 들어오는데, 이때 물의 흐름은 두 수조의 수두차로 조절된다. 이렇게 설치된 실험기 내의 배수재에 대하여 상재압력의 크기, 가압시간 등의 조건을 달리하여 압밀진행에 따른 과잉간극수압, 침하량, 통수량(배수량)을 측정하였다.

3.2 모형지반

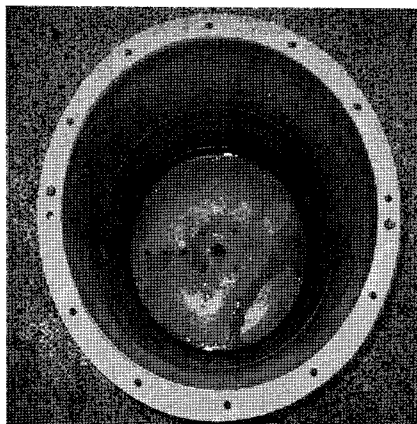
복합통수능실험에 사용된 시료는 퇴적기원이 다른 대심도 연약지반에서 채취한 점성토로서, 불교란 시료를 확보하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 실험에서는 시료를 교란된 상태로 채취하여 흙을 No.10번체로 체가



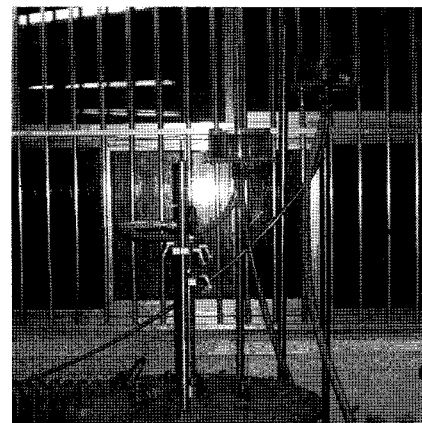
(b) 통수능 실험기(전면)



(c) 통수능 실험기(상부)



(d) 통수능 실험기(내부)



(e) 동수경사 조절장치

그림 1. 복합 통수능 실험장치

표 2. 이충연약지반의 물리적 특성

구분	특성	구분	특성
토질분류	CH	액성한계(LL)	47.32%
200번체 통과량	98%	소성한계(PL)	26.66%
비중	2.682	소성지수(PI)	20.66

름한 것을 사용하였다. 이 과정 중 실험결과에 영향을 미칠 정도의 크기가 큰 흙이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하였다. 본 실험에서 사용된 시료의 토질특성을 정리하면 표 2에서 보는 바와 같다.

3.3 실험대상 배수재

대상지역은 지형적인 특성으로 40m 이상의 대심도 연약지반이 존재하는 것으로 나타나고 있어 배수재의 선정에 주의를 기울여야 한다. 따라서 기존의 현장에서 실시한 바 있는 배수재의 자재실험결과를 바탕으로 대심도 지반에서 사용가능한 배수재를 선정하였다.

한편, 사용된 배수재의 특성은 단일코아PBD는 폭 100mm(±5mm), 두께 5.0mm(±0.5mm)의 단면을 가진 하모니카형 코어와 포켓식 필터로 구성되어 있고, 이중코아PBD는 폭 100mm(±0.5mm), 두께 7.0mm(±0.5mm)이며 코어는 2개의 코어를 맞물려 끼워놓은 이중필터의 단면을 가져 중심부에는 소정의 배수통로를 유지할 수 있게 구성되어 있다. 또한 일반적인 배수공법으로 많이 적용되는 SD공법과 비교·분석하기 위하여 이에 대한 복합통수능 실험도 병행하였다.

3.4 실험조건

본 연구에서는 점성토 지반에 연직배수재를 설치하여 실제 침하에 따른 통수능력을 살펴보고자 하였다. 배수재가 지반에 연직으로 타설되었을 경우를 모델링하기 위하여 점토에 배수재를 설치하고 상부에 일정압력을 가압함으로써 실제로 현장에서 배수재가 변형될 수 있는 조건을 모델화하여 통수능 실험을 실시하였다. 통수능력은 점토가 압밀됨에 따른 배수재 굴곡시에 측정하였고, 배수재 굴곡에 따른 통수능력 저하는 초기직립 상태의 통수능력에 굴곡시의 통수능을 빼줌으로써 산정하였다. 한편, 실험의 조건은 표 3에서 보는 바와 같이 최종 상재압력은 500kN/m²까지 가압하였으며, 점토로 채워진 셀에 일시에 500kN/m²의 압력을 적용하였을 경우 급작스런 하중 증가로 인한 과잉간극수압의 급증으로

표 3. 복합 통수능 실험조건

시 험 항 목	시 험 조 건
배 수 재 종 류	단일코아PBD, 이중코아PBD, SD
초기배수재길이	560mm
하 중	최대 500kN/m ² (50kN/m ² 부터 50kN/m ² 씩 증가)
동 수 경 사	0.5
초기 시료 높이	560mm
초기 함수비	73~77%
구 속 조 건	점토 구속

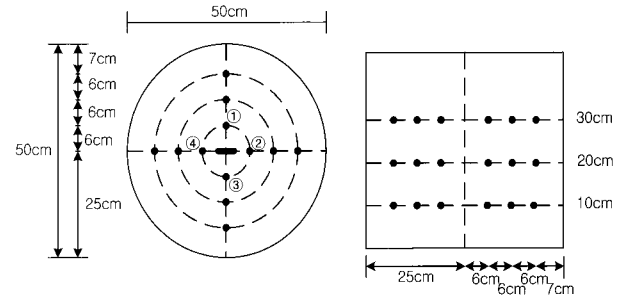


그림 2. 함수비 측정위치

시료의 불안정상태가 예상되므로 50kN/m²씩 증가시키면서 실험을 수행하였다. 실험 수행을 위해서 원통형 셀 하부의 클램프에 충분한 포화를 유도한 일정 길이의 배수재를 고정시키고, 점토를 일정높이까지 채운 후 배수재 상부 클램프를 강성재하판에 고정시켰다. 또한 유·출입 수조의 높이를 조절하여 수두차를 조절한 후, 초기압력 50kN/m²으로 일정시간 동안 가압하였다. 이때, 간극수압 측정을 통해 압력전달이 충분히 이루어졌다고 판단되면 하부의 유입밸브를 열어 유출수조의 물이 배수재 하부로 유입되도록 하고, 시간경과에 따른 침하량과 과잉간극수압 및 배출수량을 측정하였다. 즉, 모형지반의 상면은 배수조건으로 PBD를 통해 흐르는 간극수가 외부로 배출되며, 저면은 비배수조건 상태이다.

또한, 그림 2는 통수능 실험 종료 후 함수비분포 측정을 위해 측정위치를 나타낸 것이다. 함수비 측정은 시료 중앙을 중심으로 대각선 양쪽으로 6cm, 12cm, 18cm, 바닥으로부터 각각 10cm, 20cm, 30cm간격으로 총 36개소에서 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 단일코아PBD와 이중코아PBD의 통수능 비교분석

배수재의 복합통수능실험 결과로부터 침하량과 통수

능 및 간극수압 소산속도를 비교하면 그림 3, 4, 5에서 보는 바와 같다. 그림 3은 복합통수능실험에서 통수능 실험 중 압밀침하량을 측정하여 비교한 것으로 단일코아PBD가 이중코아PBD에 비해 침하속도가 빠른 것으로 나타나고 있다. 이는 이중필터로 된 강성이 강한 이중코아PBD 배수재가 점토와의 복합작용에서 초기에 침하를 지연시키는 것으로 보이며, 하중이 증가되고 시간이 경과됨에 따라 침하량이 거의 일치되어 가는 것을 알 수 있다. 실험 중 배출구를 통하여 점토 입자의 유출은 눈에 띄지 않으며 배수재 필터는 점토를 유출시키지 않고 순수하게 간극수만 배출시키는 것을 알 수 있었다.

그림 4는 단일코아PBD와 이중코아PBD의 통수능을 비교한 것으로 초기 재하전부터 통수능의 차이가 나타나고 있으며 400kN/m^2 의 측압을 가한 시점부터는 이중코아PBD가 단일코아PBD에 비하여 약 2배의 통수능을 가짐을 확인할 수 있었다. 특히 통수능이 일정해지는 시점에서도 이중코아PBD가 단일코아PBD보다 통수능이

크게 나타나고 있고, 설계통수능을 안전율을 고려하여 $10\text{cm}^3/\text{sec}$ 로 가정하면 상재하중 450kN/m^2 을 기준으로 그 이상에서는 단일코아PBD보다는 이중코아PBD를 사용해야 할 것이다.

단일코아PBD와 이중코아PBD의 간극수압 비교 그래프는 바닥과 측면에서 각각 그림 5에 나타난 바와 같이 큰 차이는 없었으나 단일코아PBD의 경우 간극수압의 반응속도와 소산속도가 더 느린 것으로 나타났다.

4.2 PBD와 SD의 통수능 비교분석

배수재의 복합통수능실험 결과로부터 단일코아PBD와 SD의 침하량과 통수능 및 간극수압 소산속도를 비교하면 그림 6, 7, 8, 9에 나타난 바와 같다.

그림 6은 복합통수능실험에서 통수능실험 중 압밀침하량을 측정하여 비교한 것으로 SD가 단일코아PBD에 비해 침하속도가 빠른 것으로 나타나고 있다. 이는 현장

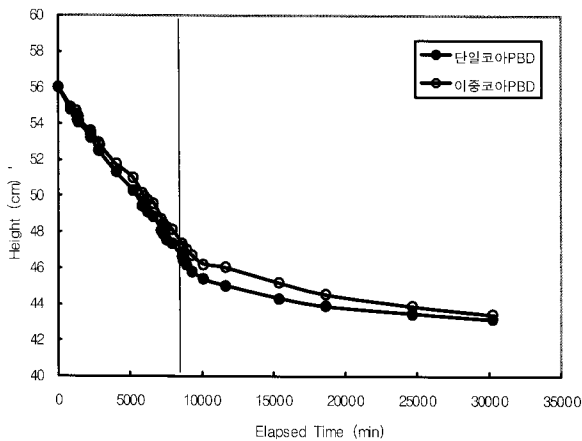


그림 3. 시간경과에 따른 침하곡선

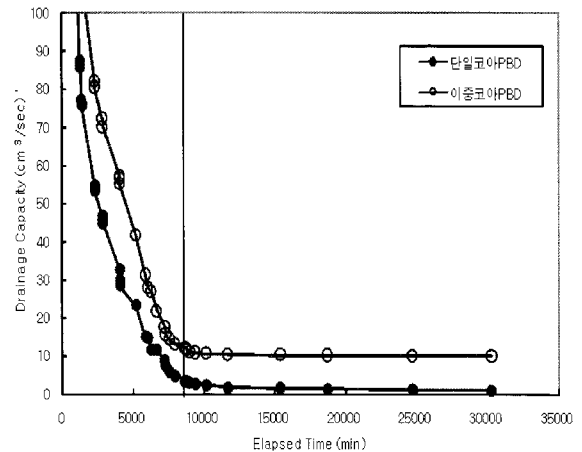
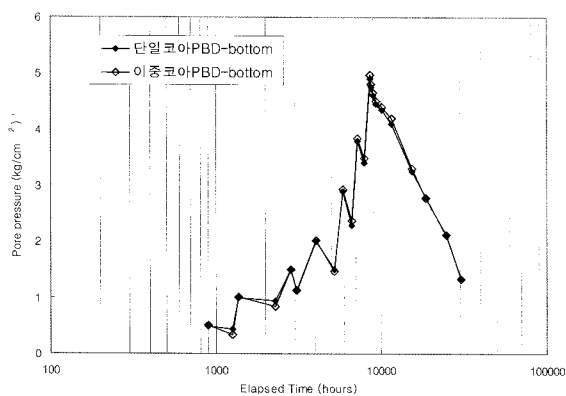
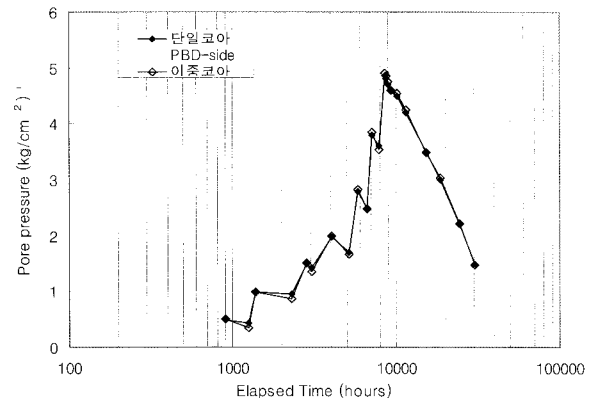


그림 4. 시간경과에 따른 통수능곡선



(a) 하부



(b) 측면

그림 5. 시간경과에 따른 간극수압 변화곡선

조건이 함수비 70%내외이므로 이를 모델화하여 비교적 저함수비에서 실험을 실시한 결과 샌드드레인이 응력 분담의 역할을 하지 못하여 연약한 점토와 함께 빠른 침하속도를 나타내는 것으로 보이며, 최종 재하단계에서 시간의 경과에 따라 단일코아PBD와 SD의 침하량은 일정한 값으로 수렴하게 됨을 알 수 있다.

단일코아PBD와 SD의 통수능의 비교는 그림 7에서 보는 바와 같이 초기 재하전부터 통수능의 차이는 크게 나타나고 있으며, 최종재하단계에서도 5배 정도의 차이를 보이고 있으나 재하하중의 증가에 따른 통수능 저하의 폭은 SD에 비하여 단일코아PBD가 훨씬 크게 나타났다.

SD의 경우 초기 상재하중의 재하로 인해 통수능이 떨어짐에도 불구하고 지반의 압밀침하는 하중단계별로 유사한 경향으로 진행되며 압밀진행에 따른 최소 통수능은 $0.4\text{cm}^3/\text{sec}$ 까지 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 값은 투수계수로 환산하면 $0.0064\text{cm}/\text{sec}$ 로서 실내모형 실험에서 모래말뚝의 직경 7.8cm인 경우의 값이며, 현

장에서 모래말뚝의 직경을 크게 함으로서 현실적인 설계치를 결정할 수 있을 것이다.

한편, 단일코아PBD와 SD의 간극수압 비교 그래프는 바닥과 측면에서 각각 그림 8에 나타난 바와 같이 큰 차이는 없으나 SD의 경우 간극수압의 반응속도와 소산속도가 더 빠른 것으로 나타났다.

4.3 배수재 변형형상 및 함수비 시험 결과

4.3.1 실험종료 후 배수재 변형 형상

복합통수능 실험종료 후 배수재의 변형 형상을 파악하기 위하여 배수재 측면 방향으로 점토를 깎아낸 사진은 그림 9에서 보는 바와 같다. PBD는 상재하중에 따라 중앙부의 굴곡형상이 두드러지고 있고, 중심에서 10cm 정도까지 변형되어 있다. 반면 SD는 전체적으로 직경이 커지는데 특히 상하부에서 직경이 더욱 커지는 변형 형상을 보이고 있다. 또한, PBD는 부분적으로 필터부에서 꺾임현상을 보이고 있는 반면 SD는 전체적으로 단면이

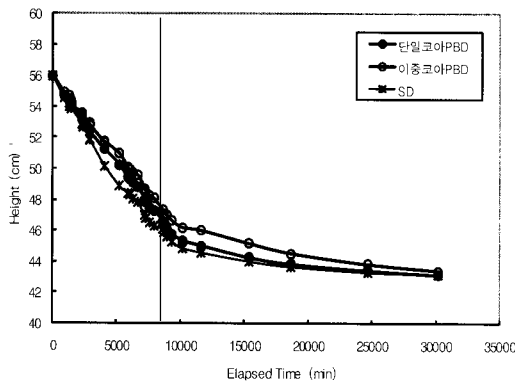


그림 6. 시간경과에 따른 침하곡선

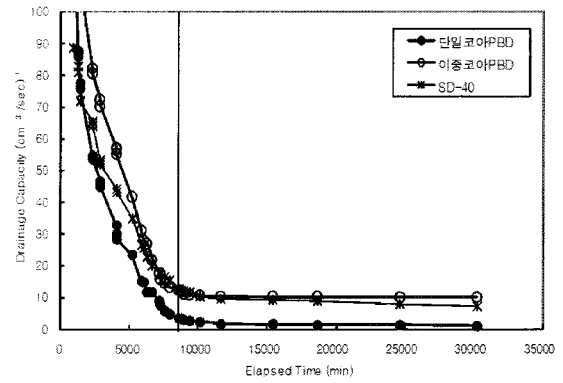
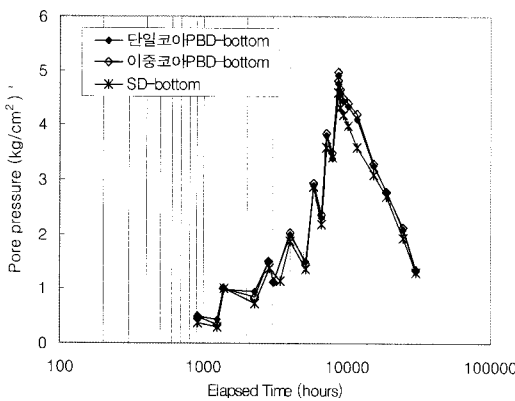
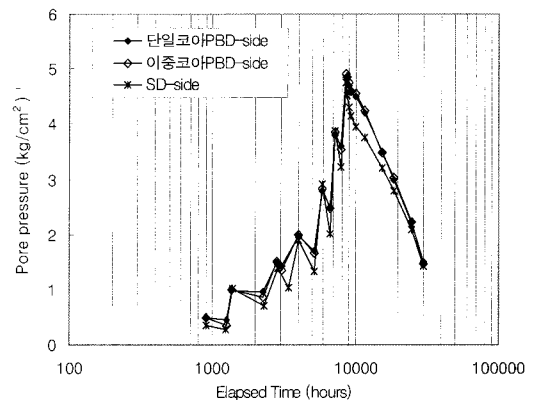


그림 7. 시간경과에 따른 통수능곡선

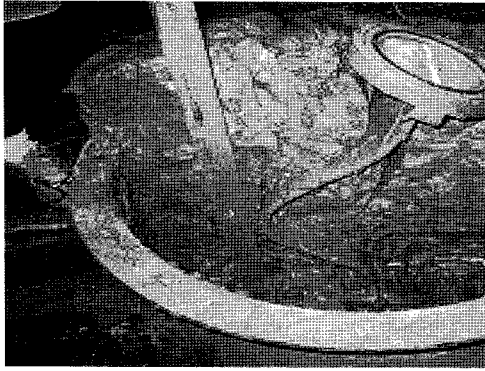


(a) 하부

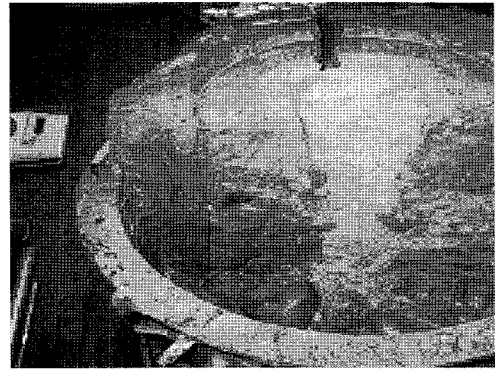


(b) 측면

그림 8. 시간경과에 따른 간극수압 변화곡선



(a) PBD의 굴곡 형상



(b) SD의 변형 형상

그림 9. 통수능 실험후 배수재 굴곡 형상

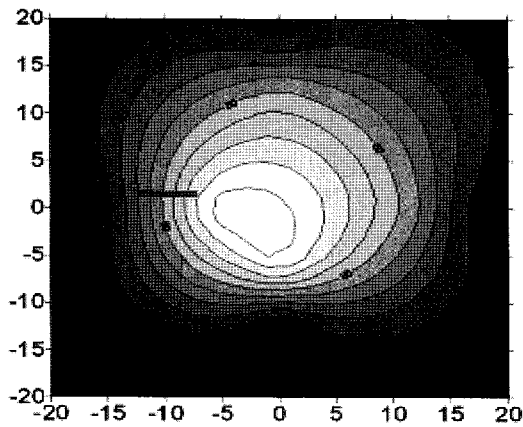
커지면서 모래의 입자가 조밀하게 되는 형상을 보이고 있다.

4.3.2 실험종료 후 점성토시료의 함수비 분포

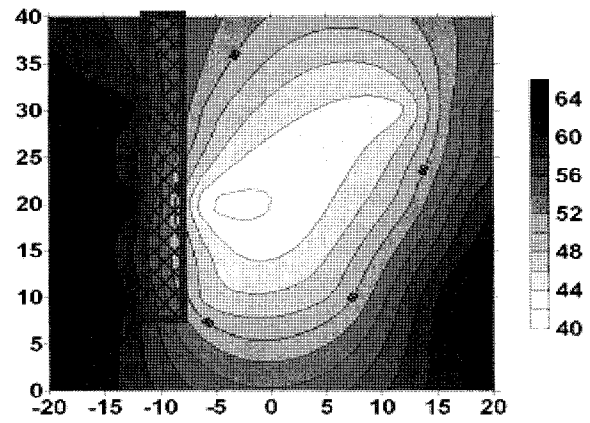
그림 10은 각 측정데이터에 의해 상부에서 본 평면단면과 옆에서 본 측면단면에서의 함수비 분포를 나타낸 것이다. 함수비분포는 단면분포도의 경우 PBD와 SD에

서 동일하게 배수재 부근에서 함수비가 작고 배수재에서 멀어짐에 따라 함수비가 증가하는 것을 알 수 있고, 측면 분포도의 경우 배수재 위치에 따라 함수비분포가 달라지고 있음을 알 수 있다. 특히 PBD의 경우 상부보다 하부에서 함수비가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

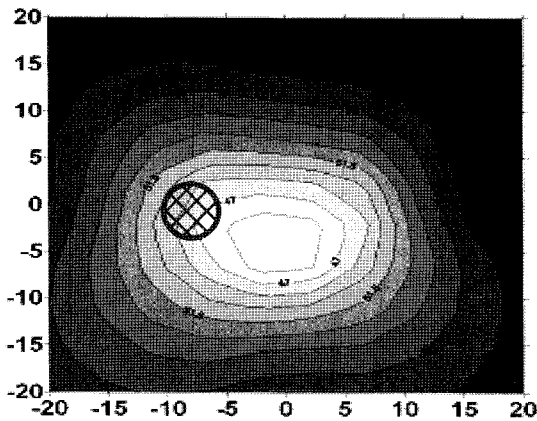
함수비 감소율을 파악하기 위하여 초기 함수비에 대한 실험종료 함수비 감소율을 도시하면 그림 11에서 보



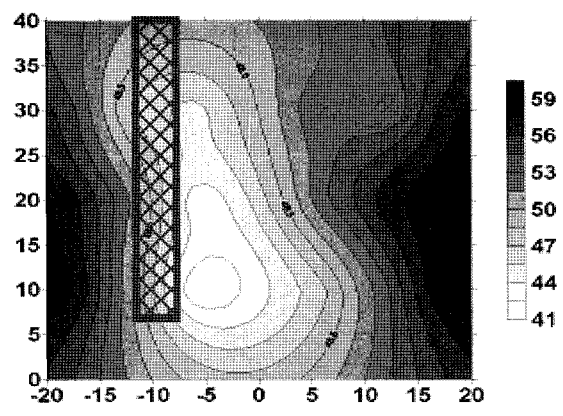
(a) 평면분포도(PBD)



(b) 측면분포도(PBD)

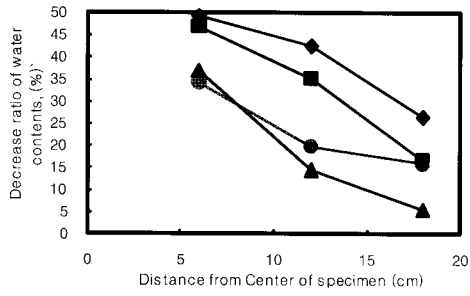


(c) 평면분포도(SD)

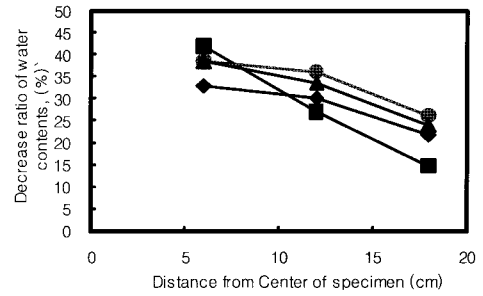


(b) 측면분포도(SD)

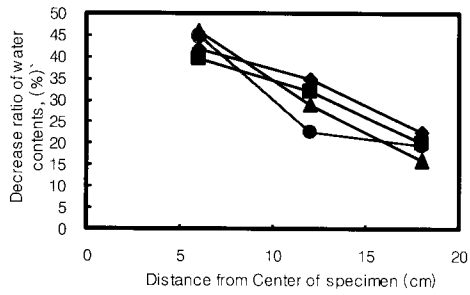
그림 10. 토조내 함수비 분포



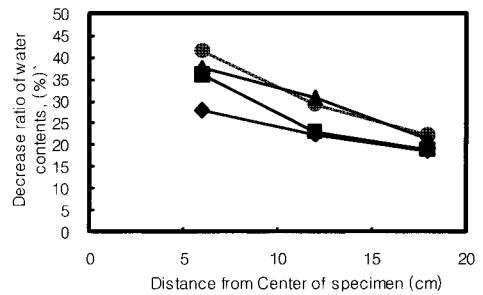
(a) 바닥에서 30cm 위치(PBD)



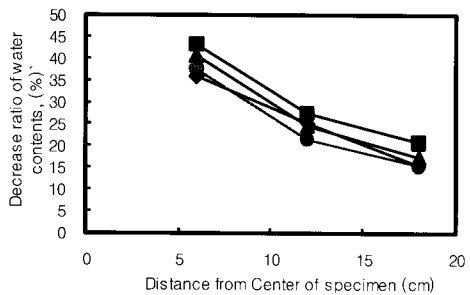
(b) 바닥에서 30cm 위치(SD)



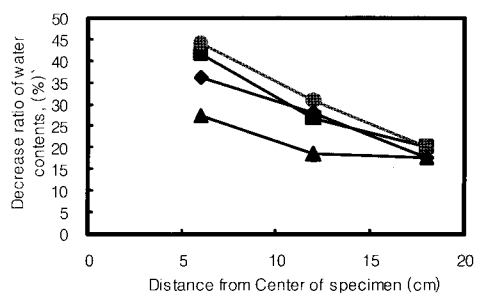
(c) 바닥에서 20cm 위치(PBD)



(d) 바닥에서 20cm 위치(SD)



(e) 바닥에서 10cm 위치(PBD)



(f) 바닥에서 10cm 위치(SD)

그림 11. 배수재로부터 거리별 함수비 감소율

는 바와 같다. 깊이별 함수비 감소율 분포를 살펴본 결과 함수비 감소율은 상부에서 변화폭이 큼에 비하여 하부에서는 변화폭이 작음을 알 수 있다. 초기함수비에 비해 상부에서 크게 감소하며, 하부로 내려갈수록 함수비 감소가 적은 것을 알 수 있어, 압밀개량효과는 하부보다 상부에서 크게 나타난 것을 알 수 있다. 한편, SD의 경우 위치별 함수비 감소율을 살펴볼 때 깊이에 따른 함수비 변화의 폭은 크지 않았고, 배수재로부터의 거리별 함수비 감소는 배수재로부터 거리가 멀어질수록 감소했다. 또, 배수재로부터의 거리가 멀어질수록, 또, 모래말뚝의 측면과 모서리 부분에서 측정된 함수비가 감소가 작게 나타남을 알 수 있었다. PBD의 경우 압밀침하에 따른 배수재 변형으로 배수재의 상대적인 위치가 변화하게 되는데, 실험 후 배수재 변형형상의 확인 결과에 따르면 배수재는 그림 2의 ③번 방향으로 위치가 이동된

것을 확인할 수 있었으며, 함수비 분포에서도 배수재 위치 이동의 영향을 확인할 수 있었다.

4.4 SEM 촬영 결과

일반적으로 현장에서 지반개량 완료 후 PBD를 SEM

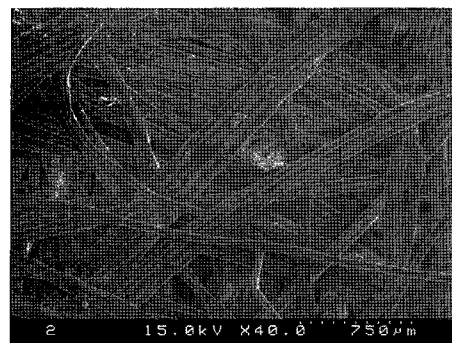
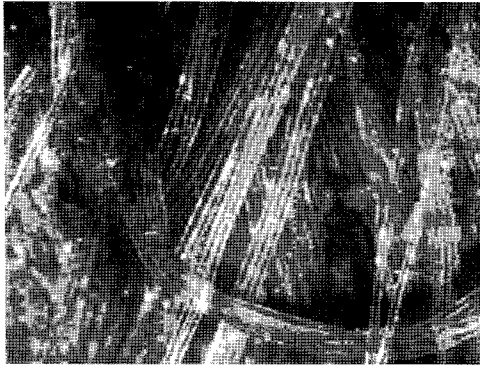


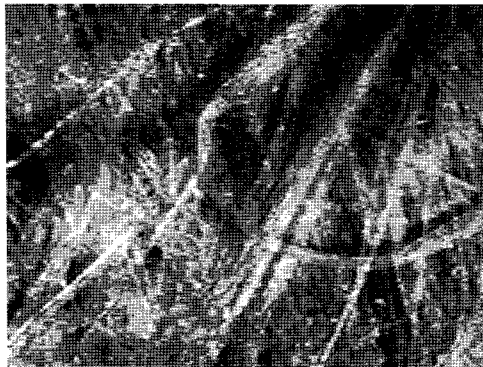
그림 12. 현장에서 지반개량 종료후의 PBD SEM 촬영 사진(40배)



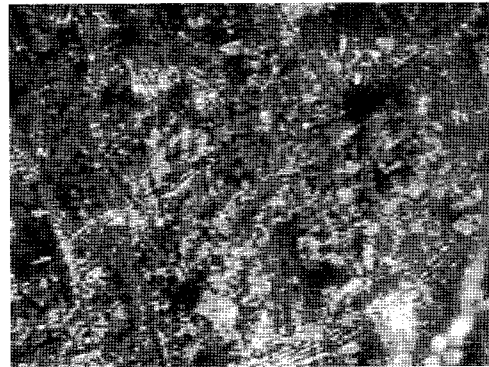
(a) 단일코어PBD(안쪽)



(b) 단일코어PBD(바깥쪽)



(c) 이중코어PBD(안쪽)



(d) 이중코어PBD(바깥쪽)

그림 13. 실험종료 후 배수재의 SEM촬영 사진(50배)

촬영한 결과는 그림 12와 같다. 본 연구에서도 복합압밀 실험 종료후 PBD의 SEM촬영을 위하여 필터부를 절삭하여 시편을 준비하고 PBD 필터의 안쪽과 바깥쪽을 촬영하였다. PBD 필터부를 배율 50배로 확대하여 촬영하여 그림 13에 나타냈다. PBD 종류와 관계없이 바깥쪽 필터부에 점토입자가 다량 점착되어 있음을 알 수 있다. 반면에 필터 안쪽에 클로깅이 그다지 발생하지 않은 것으로 나타나 이에 따른 웰 레지스턴스의 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

대심도 지반개량에 적합한 배수재를 선정하고자 단일코어PBD와 이중코어PBD에 대하여 통수능 실험을 수행하고, 이를 SD공법과 비교하여 적용성을 파악하기 위하여 동일한 조건으로 실내모형실험을 실시한 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

(1) PBD에 대한 복합통수능 실험결과, 배수재의 최소통수능은 단일코어PBD의 경우 400kN/m^2 이상에서 $10\text{cm}^3/\text{sec}$ 이상으로 측정되고 500kN/m^2 이상에서 $5\text{cm}^3/\text{sec}$

이하로 측정되며, 이중코어PBD의 경우 500kN/m^2 이상에서 $10\text{cm}^3/\text{sec}$ 이상으로 측정되었다. 따라서 대심도에서 단일코어PBD보다는 이중코어PBD를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

- (2) SD에 대한 복합통수능 실험 결과, 실내실험에서 SD의 최소통수능은 $0.4\text{cm}^3/\text{sec}$ 까지 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 값은 투수계수로 환산하면 $0.0064\text{cm}/\text{sec}$ 로서 실내모형실험에서 모래말뚝의 직경 7.8cm 인 경우의 값이며, 현장에서 모래말뚝의 직경을 크게 함으로서 현실적인 설계치를 결정할 수 있을 것이다.
- (3) PBD의 경우 배수재의 변형형상은 상재하중에 따라 중앙부의 굴곡형상이 두드러지고 있고, C자형으로 중심에서 10cm 정도까지 변형되어 있다. 반면 SD는 전체적으로 직경이 커지는데 특히 상하부에서 직경이 더욱 커지는 변형 형상을 보이고 있다. PBD는 부분적으로 필터부에서 꺾임현상을 보이고 있는 반면 SD는 전체적으로 단면이 커지면서 모래의 입자가 조밀하게 되는 형상을 보이고 있다.
- (4) 실험종료 후 함수비 분포는 $40\sim 62\%$ 로 배수재에서 멀어질수록 함수비가 커지고 깊이에 따른 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 초기함수비에 대한 최

중합수비의 차로부터 구한 함수비 감소율은 PBD의 경우 13.0~43.2%로 나타나고, 상부에서 하부로 갈수록 배수재로부터의 거리에 따라 균일해지는 값을 보여주고 있다. SD의 경우 함수비 감소율은 18.0~44.4%로 나타나고 상부에서 하부로 갈수록 배수재로부터 떨어진 거리 및 위치에 따라 변화폭이 크게 나타났다.

- (5) 실험 종료 후 PBD의 필터부를 절삭하여 SEM 촬영을 실시한 결과, 필터 바깥쪽에는 점토입자가 정착되어 있으나 필터 안쪽에는 점토입자가 거의 없었으며, 실험시의 육안관찰에서도 배출수에 세립토가 발견되지 않아 클로킹의 영향으로 통수능의 심각한 저하가 발생할 가능성은 없다고 판단된다. 특히 이 중코이PBD의 경우 중앙유로의 확보로 클로킹에 유리한 배수재로 확인되었다.

참 고 문 헌

1. 강민수 (1998), “영향인자를 고려한 연직배수재기술의 개발에 관한 연구”, 박사학위논문, 중앙대학교, pp.15-19.
2. 박영목 (1996), “국내 PBD재의 배수성능과 진공효과에 의한 통수능력 향상에 관한 연구”, *한국지반공학회 1996년도 봄 학술발표회 논문집*, 한국지반공학회, pp.39-52.
3. 박만규 (2003), *연직배수재의 통수특성에 관한 비교연구*, 석사학위논문, 대전대학교, pp.1-57.
4. 신은철, 박정준, 김종인 (2005), “연직배수재를 이용한 폐석회 슬러지의 지반개량 효과”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제6권, 제2호, pp.51-60.
5. 유승경 (2003), “PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구”, *대한토목학회 논문집*, 제23권, 제6C호 pp.399-406.
6. 유남재, 김동건, 박병수, 전상현 (2008), “관입식 복합 통수능 시험기의 개발과 적용성”, *대한토목학회논문집*, 제28권 제5C호, pp. 313-320.
7. 장용채, 김주환, 이진수 (2004), “유한요소해석을 이용한 연직 배수재의 타설범위에 따른 개량효과에 관한 연구”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제5권, 제1호, pp.5-12.
8. ASTM D 4716-01 (2001), “Test method for determining the (in plane) flow rate per unit width and hydraulic transmissivity of of geosynthetic using a constant head”, *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM, Vol. 04.09-(II), pp.1054-1062.
9. Holtz, R.D., Jamiolkowisk, M., Lancellotte, R., and Pedroni, S. (1991), “Laboratory testing of prefabricated wick drains”, *GEO-COAST '91 ICGED*, Yokohama, pp.311-316.
10. Kjellman, W. (1948), “Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells”, *Trans, ASCE*, No.113, pp.748-751.
11. Koerner, C.M. and Lawrence, C.A. (1988), “Flow behavior of kinked strip drains”, *Proc. of ASCE Symposium on Geosynthetics for soil Improvement*, Nashville, Tenn., Geotechnical Special Publication No.18, pp.22-35.
12. Oostveen, J.P. and Troost, G.H. (1990), “Discharge index tests on vertical drains”, *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, pp.345-350.

(접수일자 2009. 5. 8, 심사완료일 2009. 9. 16)