

## 대심도 연약지반 개량을 위한 이중코어 PBD 성능연구 A Study on Performance of Double-Core PBD for Improving Thick Reclaimed Ground

양정훈<sup>1)</sup>, Yang Jeonghun, 홍성진<sup>2)</sup>, Hong Sung-jin, 이우진<sup>3)</sup>, Lee WooJin, 최항석<sup>4)</sup>, Choi Hangseok, 김형섭<sup>5)</sup>, Kim Hyung-sub

<sup>1)</sup>고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정, (Graduate Student, Dept of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea University)

<sup>2)</sup>고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정, (Graduate Student, Dept of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea University)

<sup>3)</sup>고려대학교 건축사회환경공학과 부교수, (Associate Professor, Dept of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea University)

<sup>4)</sup>고려대학교 건축사회환경공학과 조교수, (Assistant Professor, Dept of Civil, Environmental and Architectural. Engineering, Korea University)

<sup>5)</sup>삼성물산 건설부문, 부산신항 북컨2단계 현장소장, (Director, Busan New Port North Terminal Project, Samsung Corporation)

**SYNOPSIS:** Prefabricated Board Drains (PBDs) recently become more widely used than conventional sand drains in improving soft ground because the PBD is more time and cost effective. The performance of PBDs is affected by disturbance in the adjacent soil formation during inserting mandrels, the intrusion of fine particles into filter fabric, and necking of the drain by excessive lateral pressure especially occurring in very deep clay formation such as the Busan New Port site. In this study, the PBD with double-core is introduced, which seems to overcome the shortcomings of usual single-core PBDs. An in-situ test program was established in the Busan New Port site, in which a set of the double-core PBDs and the single-core PBDs was installed to compare the efficiency of each of the drains. The discharge capacity of the double-core and the single-core PBDs was compared for various confining pressures in the modified Delft test and the chamber test. A series of CRS consolidation tests was performed in order to obtain profiles of void ratio-effective stress and void ratio-permeability relationships in the Busan New Port site that are used as input data in performing a numerical program ILLICON. The numerically simulated settlements of ground surface in the test site are in good agreement with those of in-situ measurements. In addition, the performance of the double-core and single-core PBDs has been experimentally and numerically compared in this paper.

**Key words :** Prefabricated Board Drain, Single-Core, Double-Core, ILLICON

### 1. 서 론

PBD 공법은 다른 연직 배수재와 마찬가지로 종방향 유로를 통하여 간극수를 배출시키는 구조를 갖고 있다. 따라서 통수능은 PBD의 가장 중요한 특성이며 이는 구속압, 배수재 형태의 변형, 필터재의 폐색 효과에 따라 큰 영향을 받게 된다. 특히 본 연구의 시험대상인 부산신항 시험site에 대해서는 대심도에 PBD가 설치되어 매우 큰 횡방향 토압이 구속압으로 작용되고, 이는 배수재의 단면크기를 감소시켜 통수능을 감소시킬 가능성이 있다. 구속압의 영향을 줄이기 위해, 기존의 단일코어 PBD를 개량하여 단면

크기를 증가시켜 배수재의 유로를 증가시킨 이중코어 PBD를 기존 단일코어PBD와 비교 실험하였다.

배수재 특성과 지반특성을 구하고, 이를 Illinois 대학에서 개발된 비선형 유한변형 압밀프로그램 ILLICON을 가지고 수치해석을 수행하고, 부산신항 매립지에 대한 현장데이터와 계측 값을 수치해석과 비교 분석하였다. 비교 결과로부터 대심도 연약지반 개량 시 이중코어 PBD의 적용성을 제시하였다(고려대학교 지반공학연구소, 2007).

## 2. 연구대상 지반 및 배수재 조건

### 2.1 시험 대상 지반

실내시험을 위한 시료채취와 현장실험은 부산신항 북컨테이너 터미널의 시험site에서 수행되었다. 두 구간에 대해 단일코어, 이중코어 두 종류의 연직배수재가 설치되어졌으며, 단일코어 구간인 구간2와 이중코어 구간인 구간3의 점토층에서 PBD 시공 전 비교란 시료를 채취하여 CRS 압밀시험과 기본토성시험을 실시하였다. 기본토성시험을 통하여 함수비 및 액/소성 특성을 파악하고, 토질분류를 하였다. 시험 지역의 경위도는 구간 2의 경우 N 35°04'33". E 128°47'56"이며, 구간 3은 N 35°04'34". E 128°47'56"로, 그림 1은 시험site의 위치이다.

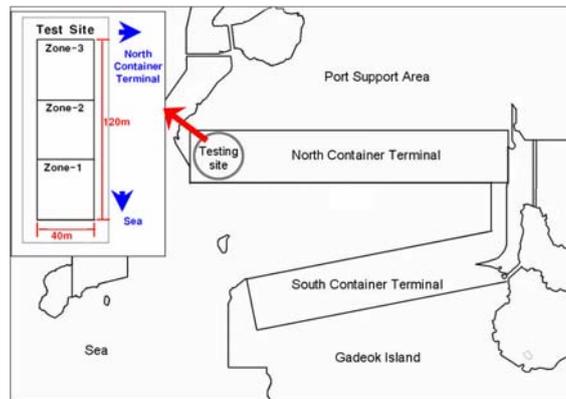


그림 1. 현장 시험site 위치

### 2.2 연직 배수재

부산신항 시험site에 단일코어, 이중코어 두 종류의 PBD가 시공되고, 실내시험에서도 동일한 두 종류의 배수재에 대하여 성능평가를 실시하였다. 단일코어, 이중코어 PBD 모두 하모니카형 코어형태이고, 단면의 크기는 단일코어 PBD는 97.5mm×3.5mm, 이중코어PBD는 100mm×7mm 이고, 각 배수재 단면의 형상은 그림 2와 같다.



(a) 단일코어 PBD

(b) 이중코어 PBD

그림 2. 연직 배수재 단면 사진

### 2.3 기본 토성시험

기본 토성시험은 구간2와 구간3의 심도 10m 시료부터 2.5m 간격으로 실시하였다. 기본 토성 시험 결과를 이용한 토질분류 결과, 통일분류법상 CL 또는 CH 로 분류 되었다. 표 1과 그림 3은 자연 함수비 및 액/소성 시험결과로, D.L.-25m까지 액성 및 소성지수가 증가하였다 감소하는 경향을 나타냈다.

표 1. 심도에 따른 UD sample 기본토성

심도(m)		구간 2				구간 3			
G.L.(-)	D.L.(-)	함수비 (%)	액성 (%)	소성 (%)	분류	함수비 (%)	액성 (%)	소성 (%)	분류
10.5	7.2	63.1	48.7	24.9	CL	67.2	54.5	27.9	CH
12.5	9.2	55.8	47.4	24.5	CL	62.6	56.5	26.7	CH
15.5	12.2	52.5	46.5	24.2	CL	58.5	53.5	27.3	CH
17.5	14.2	58.9	57.5	26.7	CH	58.6	60.6	28.8	CH
20.5	17.2	63.5	58.7	27.1	CH	70.1	68.0	28.5	CH
22.5	19.2	68.1	64.5	26.7	CH	72.3	72.1	31.0	CH
25.5	22.2	68.6	66.0	29.4	CH	70.7	65.7	28.8	CH
27.5	24.2	69.9	71.3	30.4	CH	74.7	74.1	31.0	CH
30.5	27.2	71.5	64.7	27.7	CH	51.5	52.8	24.9	CH
32.5	29.2	48.3	52.3	25.0	CH	57.6	55.2	26.2	CH
35.5	32.2	45.7	44.7	22.4	CL	29.3	43.5	20.7	CL
37.5	34.2	38.5	36.7	19.3	CL	35.5	38.0	20.5	CL
40.5	37.2	36.3	39.8	21.2	CL	33.2	35.9	19.1	CL

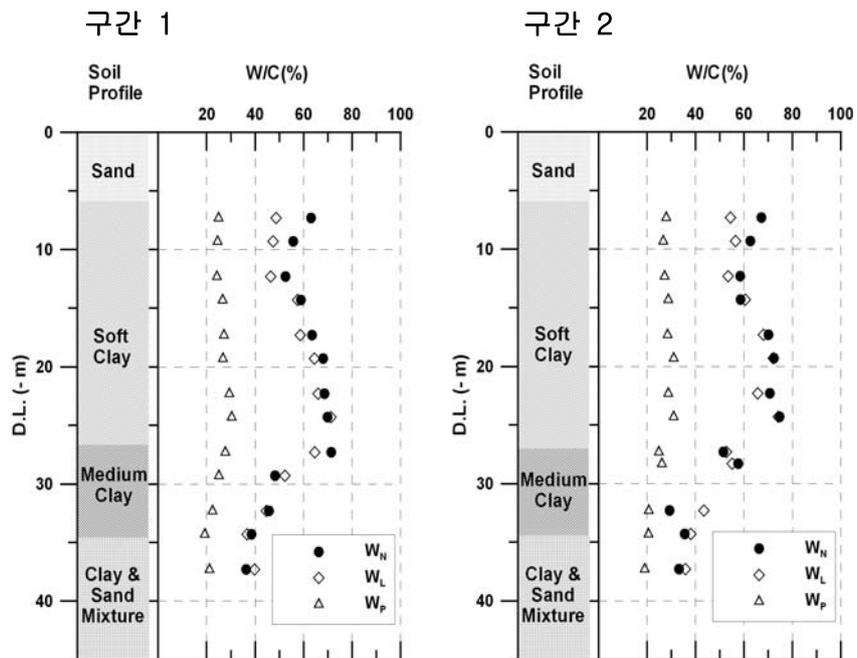


그림 3. 심도에 따른 액/소성 및 현장함수비 분포

### 3. 시험 내용 및 계속

#### 3.1 통수능 시험

연직배수재의 투수성 및 배출가능유량은 배수재 종방향의 통수능에 좌우되고, 배수재 내로 유입되는 유량은 지반의 투수계수와 두께에 비례하는 동수구배의 크기에 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 배수재의 통수능을 초과하여 간극수가 유입될 때, 배수재 종방향 간극수 배출에 저항이 생기며, 이는 압밀속도를 저하시키는 요인으로 작용된다. 이처럼 종방향으로 간극수가 배출될 때, 배수재가 받는 저항을 배수저항(well resistance)이라고 정의하고, 이 배수저항은 Mesri와 Lo(1991)에 의하면 통수능(discharge capacity,  $q_w$ )에 반비례하고, 지반의 횡방향 투수계수,  $k_h$ 와 배수재의 타입길이,  $H$ 의 제곱에 비례하는 관계로 표현하고 식 (1)과 같다.

$$\text{배수저항; } R \propto \frac{k_h H^2}{q_w} \quad (1)$$

연직 배수재의 목적은 배수거리를 인위적으로 단축하여 간극수의 배출을 촉진시킴으로써 압밀침하속도를 증가시키고 이에 따라 지반의 전단강도를 조속히 증진시키는 것이다. 따라서 간극수의 원활한 배출과, 배수저항의 영향 감소를 위하여 배수재의 연직투수계수(longitudinal permeability,  $k_w$ ) 또는 통수능력(discharge capacity,  $q_w$ )이 반드시 고려되어야 하고, 이는 식(2)와 식(3)과 같이 표현된다.

$$q_w = \frac{Q}{i} \quad (2)$$

$$k_w = \frac{q_w}{A_w} \quad (3)$$

여기서,  $Q$  : 배수재를 통과하는 배수량 ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )

$i$  : 동수구배

$A_w$  : 통수에 필요한 배수재의 배수 단면적 ( $\text{cm}^2$ )

실제 지반에서는 구속압, 배수재 변형, 필터재 폐색효과 등의 요인이 배수저항에 영향을 미치게 된다. 지반 내에 타입 된 배수재는 주위의 측방 토압에 의해 배수재가 가지고 있는 유로의 단면적 감소로 인하여 통수능력이 감소된다. 또한 압밀에 의한 지반의 변형에 의해 배수재의 휨이나 굴곡 등이 발생하고, 세립자들이 배수재 내에 퇴적되어 배수재 내부가 막히는 폐색효과(filter clogging)도 나타나 통수능력이 감소된다. 현장조건에서 발생하는 구속압, 배수재 변형, 필터재 폐색효과와 같이 배수저항에 영향을 미치는 복합적인 요소들을 고려하기 위하여, 표 2의 시험조건으로 개량델프트 시험, 대형 Chamber 시험(KUCCS)을 실시하였고, 이를 통해 배수재의 통수능을 측정하였다.

표 2. 배수재 시험 조건

시험종류	시험조건	구속압 (kPa)	시험 방법	배수재종류
개량델프트시험		100	현장시료 함수비, 7일 통수시험	단일/ 이중코어
		300	현장시료 함수비, 7일 통수시험	단일/ 이중코어
		500	현장시료 함수비, 50일 통수시험	단일/ 이중코어
		500	PBD 변형 시험, 7일 통수시험	단일/ 이중코어
대형 Chamber 시험		100~300	단일코어, 이중코어 PBD를 동시에 타입 시간에 따른 배수량과 침하량을 측정	단일/ 이중코어

### 3.1.1 개량 델프트 시험

Miura등(1988)은 기존 델프트 시험기를 개량하여, 멤브레인과 PBD 사이에 점토를 넣고 구속압을 가하여 통수능 시험을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 개량 델프트 시험기는 아크릴재 셀에 PBD를 설치하고, regulator를 이용하여 셀 내부에 일정한 구속압을 가하고, 상·하부 수조의 수위를 일정하게 유지하여, 일정 동수경사에 물을 통수시켜 PBD의 통수능을 산정하는 시험기이다. 현장상태의 묘사를 위해 PBD와 멤브레인 사이에 현장시료를 조성하여 흡속에서 PBD 통수능력을 파악하며, 구속압의 변화와 동수경사 그리고 시간에 따른 통수능을 측정하였다.

### 3.1.2 대형 Chamber 시험(KUCCS)

대형 chamber 시험(KUCCS; Korea Univ. Calibration Chamber System)은 현장상태의 지반조건 구현이 가능하도록 하여, 시간에 따른 PBD의 배수량 및 시료의 압밀을 확인하는 시험으로 압밀 진행에 따른 배수량 감소량과 감소비율을 확인할 수 있도록 한다. 직경 1.2m, 높이 1.0m의 크기의 대형 chamber system을 이용하여 균질한 시료를 조성하여 단일코어 및 이중코어 PBD를 설치하여 압밀 중 배수재를 통한 간극수 배출량과 침하량을 측정한다. 초기 시료를 100kPa으로 압밀하고, PBD를 타설한 후, 300kPa까지 가압을 하여 시료를 압밀시켰다. 시험 종료 후 시료 해체를 통해 각 PBD의 변화 양상을 관찰하고, PBD를 회수하여 내부 clogging 정도를 파악하였다.

### 3.2 CRS 압밀시험

CRS 압밀시험은 시간에 따른 변형률을 일정하게 유지하고, 일면 배수조건으로 시료 하부에서 과잉간극수압을 측정하여  $e - \log \sigma'_v$ 와  $e - \log k_v$  관계를 측정한다. 본 시험에서 변형속도는 ASTM(1982)에서 제시한, 시료의 액성한계에 따른 변형속도 값을 취하였다. 부산신항 컨테이너 터미널에 조성된 현장 시험 site의 두 구간(구간2와 3)에서 비교란 시료를 채취하여 각 구간의 심도별  $e - \log \sigma'_v$ 와  $e - \log k_v$  관계를 파악하였다.

### 3.3 현장계측

2개 구간에 대하여 계측기를 이용하여 공정과 시간에 따른 지표면 침하량, 층별 침하량과 과잉 간극수압을 측정하고 이를 실내 시험 및 수치해석과 비교하도록 하였다. 계측은 현장 사정상, 구간2에서 단일코어 PBD 타설과 구간3에서 이중코어 PBD 타설이 완료된 이후, 최초 모래apt트에 의한 선행하중 적용일 기준으로 130일 이후부터 두 구간(구간2와 3)에서 계측이 시작되었다. 표 3은 설치된 계측기 현황이고, 그림 4는 계측기 설치된 깊이별 위치와 평면상에서 계측기 설치지점을 보여준다.

표 3. 계측기 설치 현황

계측기	활용	수량(EA)
층별 침하계(■)	각 층의 침하량 및 층별 침하에 따른 층별 압밀도 추정	4
간극수압계(▲)	간극수압 측정, 압밀도 측정 및 개량효과 산정	4
지하 수위계 (■)	지하수위 측정	3
Prism 지표면 침하관(●)	전체 침하량, 시공 중 지표 침하 추정	2
간이 침하관(✕)	시공 중 침하량 측정	7

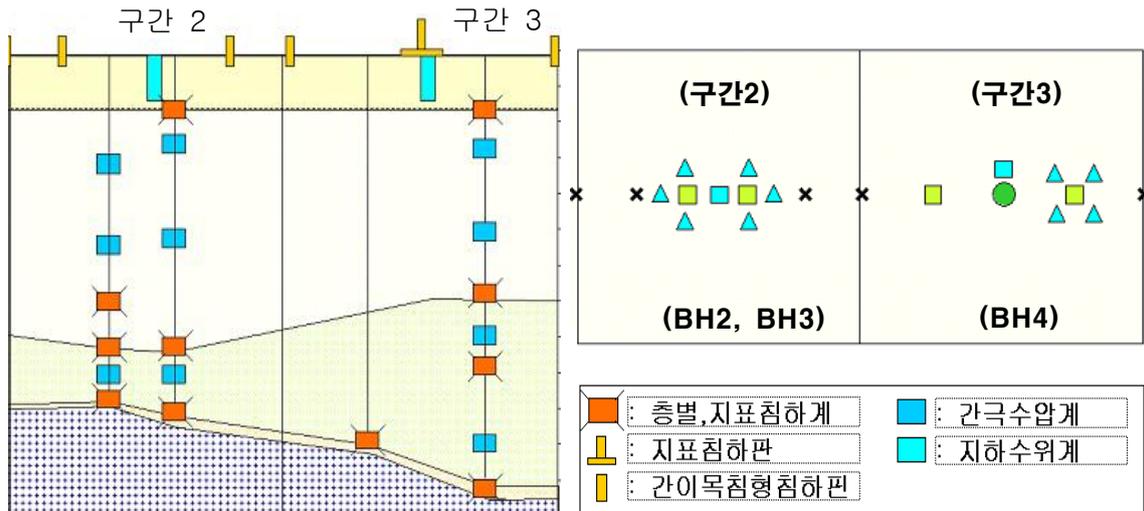


그림 4. 현장 계측기 위치도

## 4. 수치해석

### 4.1 ILLICON 압밀해석 프로그램

Mesri는 재압축지수, 압축지수와 함께  $e - \log \sigma_v'$ 를 이용한 연직 배수재에 대한 압밀이론을 발전 시켰으며,  $e - \log k_v$ 를 통한 압밀동안의 투수도의 변화를 고려하였다. 이후 Mesri와 Choi(1985)는 다층에 대한 압밀해석으로까지 발전시켰고, 이차원 축대칭을 모델로 하여 수치해석 프로그램을 개발하였다. ILLICON 프로그램은 개발된 후에 SKA-EDEBY Test Fills(Sweden), CHANGI Airport-Runway (Singapore), CHANGI Airport-Sia Hangar(Singapore), CHEK LAP KOK Replacement Airport(Hong Kong) 4개 현장에서 24개 구역에 대한 해석이 이루어 졌다(Lo, 1991; Mesri 등, 1988). 수치해석과 함께 실측값에서 역해석을 통한 수치해석의 신뢰성 및 정확성에 대한 검증과 함께 수정 보완되어 현재 버전에 이르렀다. ILLICON은 단계적인 성토에 의한 하중재하 스케줄을 적용 할 수 있고, 배수재가 점토층을 전체관입 할 경우, 부분관입 할 경우 모두 해석이 가능하며, 배수재의 설치시기, 스미어존에서의 지반 물성치를 지정해 줄 수 있다.

### 4.2 ILLICON 압밀해석 조건

ILLICON프로그램은 배수재와 지반의 물성치, 기하학적 배치조건, 그리고 각층의  $e - \log \sigma_v'$ 와  $e - \log k_v$  관계가 입력치로 필요하다. 구간2와 구간3에서 해석조건은 표 4와 같고, 표 5는 해석에 적용 된 수평 모래 매트와 PBD 설치, 그리고 하중 재하 스케줄을 보여준다. 연약층의 총 깊이는 45m이고, 배수재는 40m 까지 설치가 되어졌다. 구간2에서는 PBD설치일을 120일로 설정하고, 구간3에서는 130일로 설정하였다. 이는 PBD 설치가 실제 시공기간이 소요되므로 각 구간에 대한 수치해석을 수행하여 가장 근접한 설치일을 추정하였다. 배수재 특성은 개량델프트 시험결과를 이용하여 환산직경과 배수재의 투수계수를 산정하였다. 단일코어 PBD는 30cm<sup>2</sup>/sec, 이중코어 PBD는 40cm<sup>2</sup>/sec의 투수능을 적용하고, 실제 배수재 특성이외에 표 6에서와 같이 다양한 배수재의 투수능에 따라 압밀해석을 수행하여 시간경과에 따른 투수능 감소를 압밀시 침하거동 양상을 통하여 예측해 보았다.

표 4. ILLICON해석 시 물성치 및 지반조건

분류	두께 (m)	$k_h/k_v$	층수	배수재 설치깊이 (m)	유효반경 (m)	배수재 환산직경 (cm)	상·하부배수조건	배수재설치일 (일)	배수재 투수계수 (cm/sec)
구간2	45	1.0	5	40	1.13	3.326	모두 배수	120	3.452
구간3	45	1.0	5	40	1.13	5.424	모두 배수	130	1.731

표 5. 현장 시공 스케줄

구분	일시	계측기준 (일)	성토기준 (일)	단계별 성토고 (m)	단계별 성토하중 ( $t/m^2$ )	누적 성토하중 ( $t/m^2$ )
모래성토	06-01-01	-	0	6	6.8	6.8
PBD설치	06-04-15	-	120 <sup>*1)</sup> / 130 <sup>*2)</sup>	-	-	6.8
계측시작	06-05-08	0	130	-	-	6.8
1차성토	06-06-13	37	166	2.0	3.82	10.62
2차성토	06-06-22	46	175	3.7	7.07	17.69
3차성토	06-07-05	59	188	2.9	5.56	23.25
4차성토	06-07-12	66	195	2.0	3.80	27.05
5차성토	06-07-31	85	241	2.3	4.29	31.34

\*1) : 구간2 PBD 설치일

\*2) : 구간3 PBD 설치일

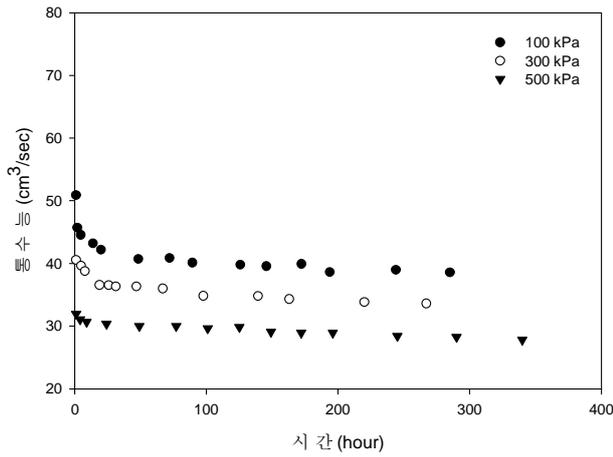
표 6. 배수재 통수능 케이스별 지반조건

분류	구간2 (단일코어)			구간3 (이중코어)			
	10	20	30	10	20	30	40
통수능( $cm^3/sec$ )	10	20	30	10	20	30	40
투수계수( $cm/sec$ )	1.151	2.301	3.452	0.433	0.866	1.298	1.731

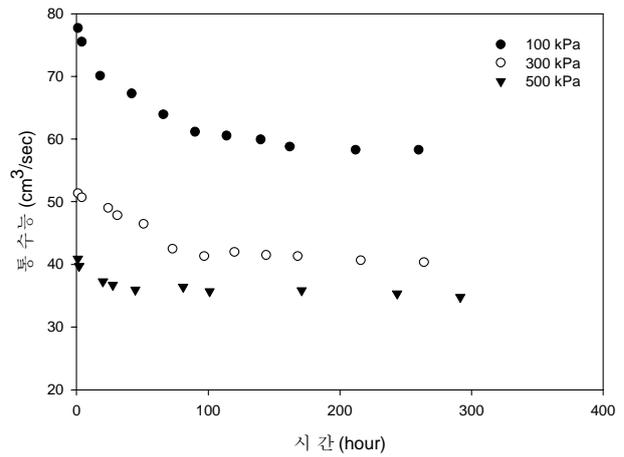
## 5. 시험결과 및 분석

### 5.1 개량 델프트 시험

단일코어 PBD와 이중코어 PBD에 대하여 구속압 100kPa, 300kPa, 500kPa 조건에서 동수경사를 0.1로 고정하고 12일간의 통수능 시험을 실시하였다. 그림 5는 단일코어 PBD 와 이중코어 PBD에 시간에 따른 통수능을 나타낸 그래프이고, 그림6은 단일코어 PBD와 이중코어 PBD의 시간에 따른 통수능 변화를 초기 통수능으로 정규화하여 나타낸 그래프이다. 그림 5에서 동일한 구속압 조건에서 이중코어 PBD가 단일코어 PBD보다 약 40%~50% 정도 통수능이 크게 나타났으며, 이중코어 PBD의 초반 통수능이 단일코어 PBD에 비하여 완만하고 오랫동안 감소하는 경향을 보인다. 그리고 구속압에 따른 통수능을 보면 이중코어 PBD는 300kPa과 500kPa의 통수능 차이가 100kPa과 300kPa 통수능 차이에 비하여 현저히 줄어들었다. 그림 5의 통수능 시험결과는 신은철 등(2007)이 복합통수능 시험장비로 단일코어 및 이중코어 PBD에 대해 측정된 결과와 유사하다.

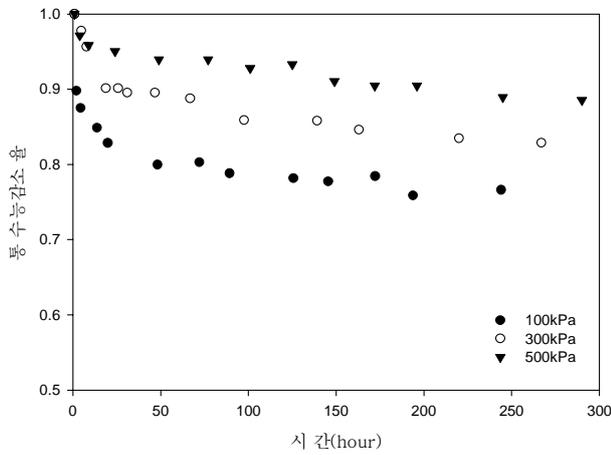


(a) 단일코어 PBD

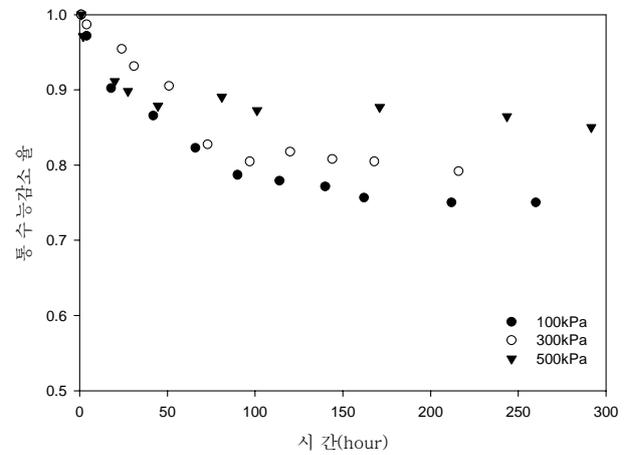


(b) 이중코어 PBD

그림 5. 시간에 따른 통수능 변화



(a) 단일코어 PBD



(b) 이중코어 PBD

그림 6. 시간에 따른 통수능 변화(정규화)

## 5.2 대형 Chamber 시험

대형 chamber를 이용하여 현장지반과 동일한 조건하에 PBD를 설치하고, 압력을 300kPa까지 높여 압밀을 실시하였다. 압밀 중 침하량과 각 배수재의 배수량 비교를 통하여 각 PBD의 상대적인 지반개량 능력을 비교하고, 시험 종료 후, PBD의 절곡상태나 내부 clogging 상태 등을 파악하였다.

그림 7은 시간에 따른 침하량을 나타낸 것이며, 그림 8은 시간에 따른 배수재 별 챔버내에서 압밀에 의한 배수량을 나타낸 것이다. 그림 8(a)를 보면 이중코어 PBD가 단일코어 PBD에 비해 10%~25% 정도 압밀 배수량이 크게 나타났으며, 두 배수재의 배수량 비는 100~500시간 사이에 크게 나타났다. 그림 8(b)는 정규화 시간에 따른 배수량을 초기 배수량으로 나눈 정규화 된 배수량을 나타내는 그래프로, 두 PBD의 경향이 유사하게 나타났다. PBD의 변형은 국부적인 굴곡이 주로 발생하였고, 전체적인 변형이나 절곡 현상은 발생하지 않았으며, PBD 내부를 해체한 결과 두개의 PBD 모두 clogging 현상은 없었다.

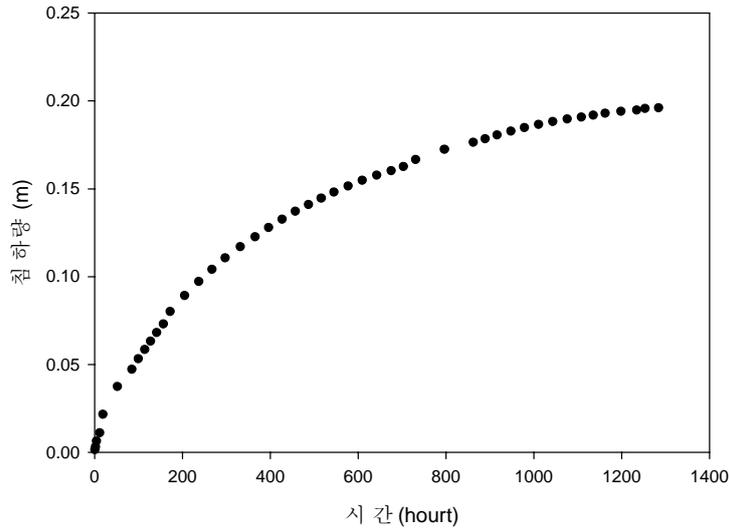
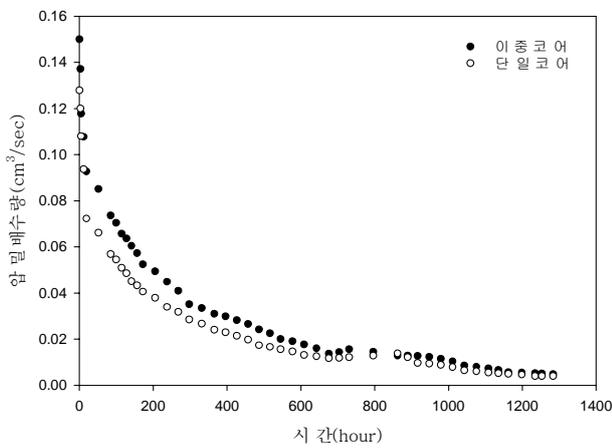
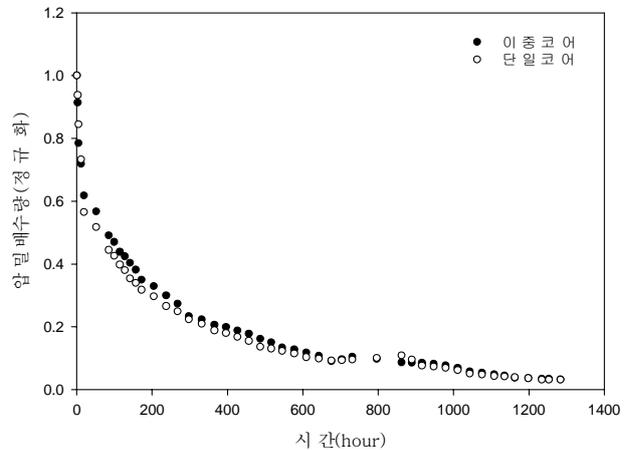


그림 7. 시간에 따른 침하량



(a) 시간에 따른 배수량



(b) 시간에 따른 배수량(정규화)

그림 8. 단일코어 PBD와 이중코어 PBD의 시간에 따른 배수량

### 5.3 CRS 압밀시험

단일코어PBD가 설치된 구간 2와 이중코어PBD가 설치된 구간 3구역에서 비교란 시료를 채취하고, 각 구역의 5개층에 대한 CRS 압밀시험을 하여 각 층에서의  $e - \log \sigma'_v$ 와  $e - \log k$ 관계를 도출하였다. 5개 층은 지표에서부터 10m깊이 4개 층과 5m깊이의 1개 층으로 구분하였다. 그림 9에서 각 층에서 대표시료의 압밀해석 결과를 보면, 5개 층 모두가 초기 간극비에서 부터 시작하여 이후 선형에 가까운 값을 보이며, 상부4개 층은 각각 다른 간극비-유효응력 관계를 보이거나, 최 하단 층은 4번째 층과 거의 일치함을 보이고 있다. 이는 5번째 층의 깊이가 5m로 적고 4번째 층과 동일한 지반 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 그림 10에서는  $e - \log k$  관계가 선형적으로 간극비가 감소함에 따라 투수계수가 감소함을 보여주고 있다. 2 구간, 3 구간 각 층에 대한  $e - \log \sigma'_v$ 와  $e - \log k$  관계를 구하고, 이를 ILLICON 압밀해석 프로그램에 입력을 하여 수치해석을 수행하였다.

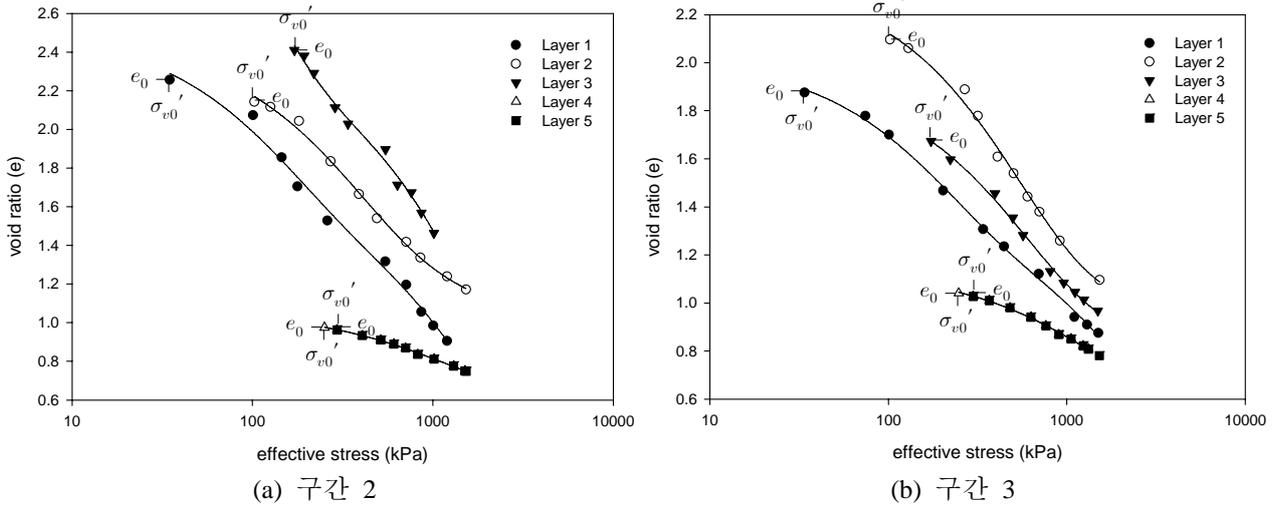


그림 9. 간극비 유효응력 관계 ( $e - \log \sigma_v'$ )

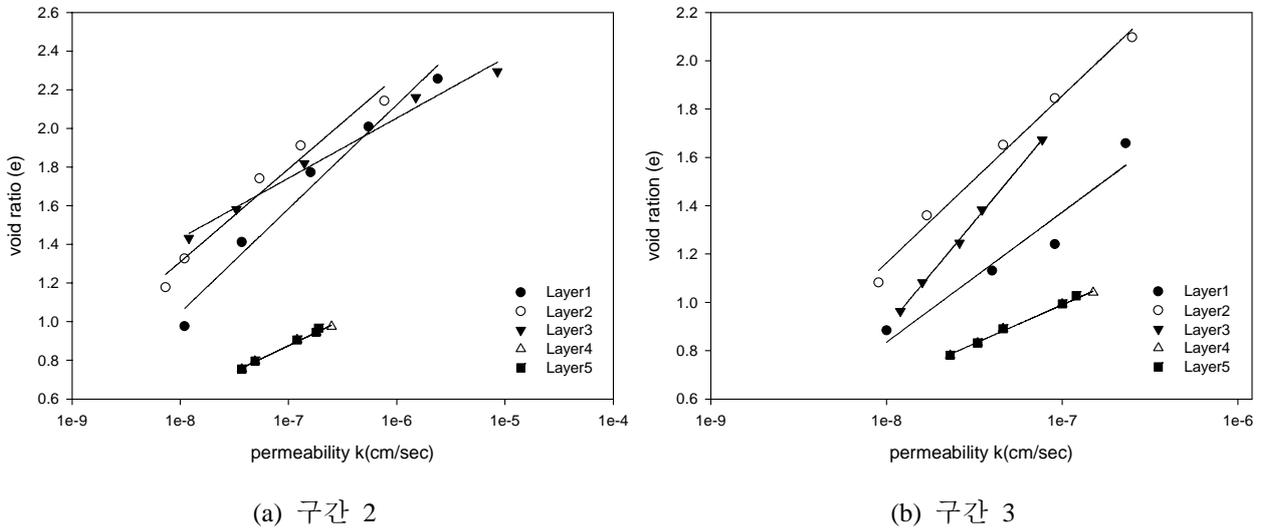
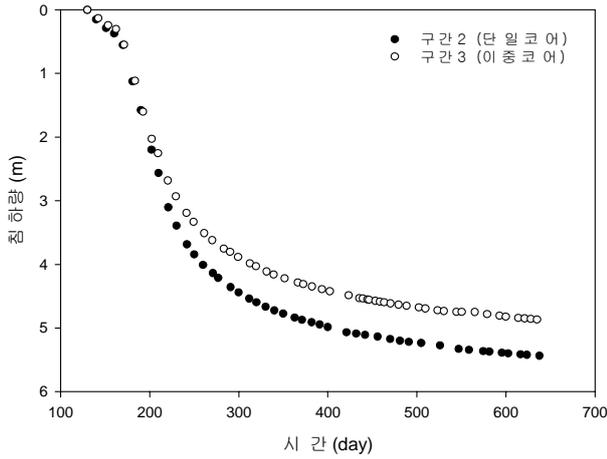


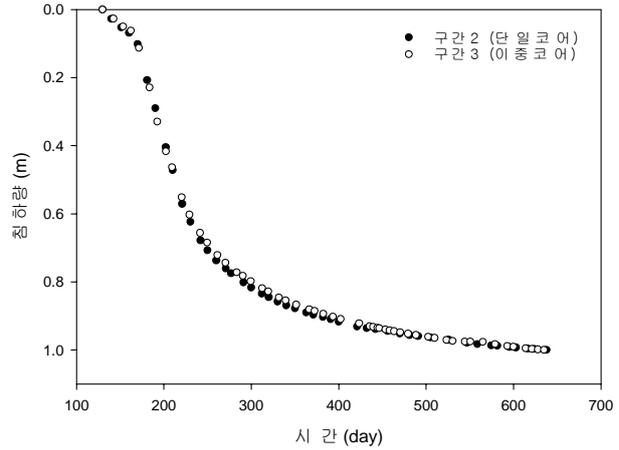
그림 10. 간극비 투수계수 관계 ( $e - \log k$ )

## 5.4 현장계측

현장계측은 현장 여건상 배수재가 설치된 후, 모래멧트에 의한 선행하중 재하시점으로부터 130일 부터 시작되었다. 단일코어 PBD가 시공된 구간2와 이중코어 PBD가 시공된 구간3의 지표면 침하량은 그림 11(a)와 같다. 계측은 130일부터 시작하여 630일 까지 500일간 측정되어졌고, 지표면 침하량은 구간2는 5.44m, 구간3에서는 4.87m로 최종 계측되었다. 두 구간에 대한 실제 침하량은 차이가 나고 있는데, 이는 각 구간의 점토층 두께 및 압축성의 차이로 인함을 유추할 수 있다. 절대적 침하량 비교로는 두 PBD의 대심도에서의 성능비교가 어렵기 때문에 각 구간에서의 전체 침하량으로 각 시간별 침하량을 정규화 하여 비교해야 한다. 그림 11(b)의 정규화 된 침하량 그래프에서 보면, 두 구간이 매우 유사한 속도의 침하 거동을 보인다. 따라서 본 시험site에서는 두 PBD간의 성능 차이는 거의 없다고 볼 수 있다.



(a) 침하량

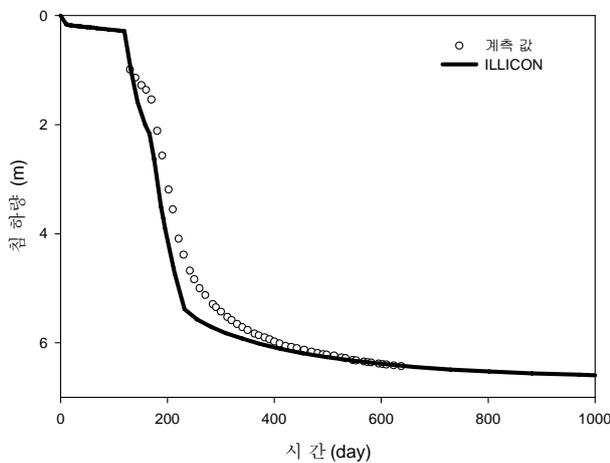


(b) 침하량(정규화)

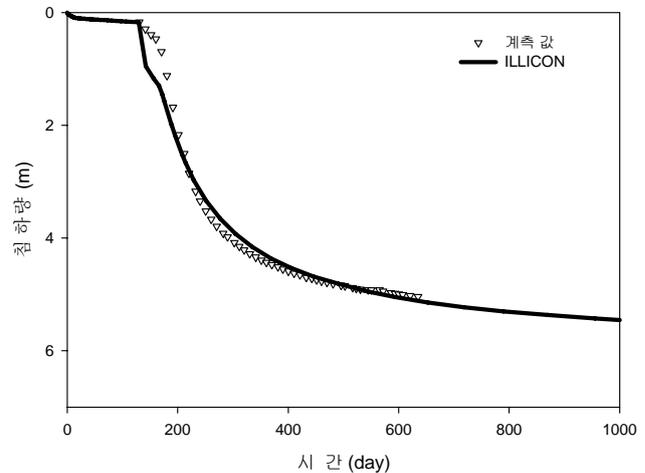
그림 11. 지표면 침하곡선

### 5.5 ILLICON 해석결과

본 연구에 사용된 현장 침하량 계측 값은 모래뿔트 시공으로 인한 선행하중이 적용되고 130일 이후부터 측정된 값이다. 이는 계측기가 설치되기 전 130일 동안의 침하량에 대해서는 측정할 수가 없었다. 따라서, 계측 이전 130일 침하량은 ILLICON 수치해석을 통하여 구하고, 이를 130일 시작 계측 값에 누적하여 실제 지반 침하량으로 보고, 이를 다시 130일 이후 수치해석 결과와 비교 분석하였다. 그림 12에서, 구간2에서는 단일코어 설치일인 120일에 0.99m에서부터 시작되어 6.43m까지 침하되었고, 구간3에서는 이중코어 설치일인 130일에 0.169m에서 시작하여 5.036m까지 침하되었다. 구간2, 구간3 모두에서 계측 값과 수치해석 결과가 비슷한 침하량과 거동양상을 보인다.



(a) 구간 2



(b) 구간 3

그림 12. 현장 계측 값과 ILLICON해석 값 비교

그림 13은 배수재의 투수능을 임의로 변화시켜 얻은 수치해석 결과이다. 구간2, 구간3 두 구간 모두 배수재의 투수능을 예상 설계투수능(단일코어 경우는  $30\text{cm}^2/\text{sec}$  그리고 이중코어 경우는  $40\text{cm}^2/\text{sec}$ )에서 부터  $10\text{cm}^2/\text{sec}$  까지 줄여서 비교하였다. 이는 개량델프트 시험결과,  $500\text{kPa}$  구속압에서 단일코어 PBD인 경우 예상 설계투수능  $30\text{cm}^2/\text{sec}$ 와 이중코어 PBD의 경우  $40\text{cm}^2/\text{sec}$ 를 기준으로, 대심도에서 구속압에 따른 배수재의 단면적 감소나 미세입자의 배수재내 축적에 따른 투수계수 감소영향을 보기위하여 투수능을  $10\text{cm}^2/\text{sec}$ 까지 줄이더라도 전체 침하량에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 따라서 두가지 PBD 모두 대

심도에서 충분히 적용할 수 있는 여유 통수능을 가지고 있음을 알 수 있다. 특히, 이중코어 PBD뿐만 아니라 단일코어 PBD도 본 시험site와 같은 대심도 연약지반 개량에 별다른 PBD 성능저하 없이 사용이 가능함을 보여준다.

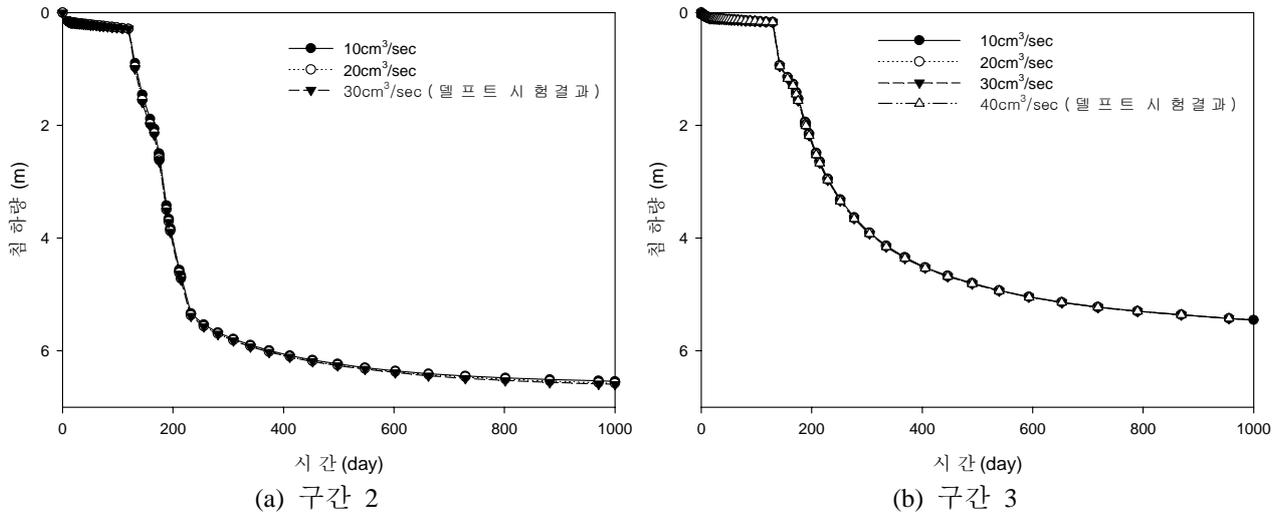


그림 13. 배수재 통수능에 따른 침하거동

## 6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 실내시험으로 개량델프트 시험을 통해 배수재의 통수능을 측정하였고, 대형 chamber 시험을 통해 실제 지반조건에서 배수재의 통수능 변화를 유추하고, 지반기본물성치 실험과, 시험지반의 시료를 채취하여 CRS 압밀시험을 통해 지반특성을 알아내었다. 이를 ILLICON프로그램에 입력하여 압밀해석을 수행하여 현장 계측값과 비교 분석하고, 단일코어PBD와 이중코어PBD의 성능을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실내시험 결과, 단일코어PBD 보다 이중코어PBD의 통수능이 크며, 이는 구속압이 증가하여도 같은 양상을 보인다.
2. 실내시험을 통해 얻어진 지반정수와, 지반조건을 이용하여 ILLICON프로그램을 통해 압밀해석을 수행하였고, 이는 현장 계측치와 비교하여 보았을 때, 잘 일치됨을 알 수 있다.
3. 이중코어PBD는 단일코어PBD에 비하여 높은 통수능을 갖는다. 그러나 두 배수재 모두 대심도 연약지반에서의 구속압에서도 충분한 통수능을 유지하여, 배수저항을 일으키지 않았다. 본 연구에서 실제 현장에서의 단일코어PBD와 이중코어PBD의 배수능력의 차이는 미미함을 알 수 있다.

**감사의 글:** 본 연구는 삼성물산 건설부문의 지원으로 수행되었으며, 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 고려대학교 지반공학연구소(2007). 대심도 연약지반 개량을 위한 이중코어 PBD 성능연구보고서.
2. 신은철, 김성환, 잔나라 나자로바 (2007). “코어형태에 따른 연직배수재의 압밀도 분석” 한국토목섬유학회논문집, 제6권 4호, pp. 15-20.
3. Lo, D. O. K. (1991). "Soil improvement by vertical drains", *Doctor thesis*, University of Illinois
4. Mesri, G. and Choi, Y. K. (1985). "Settlement analysis of embankments on soft clays", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 100, No.8, August, pp.889-904.
5. Mesri, G. and Lo, D. O. K. (1991). "Field performance of prefabricated vertical drains", *Proc. of Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development*, Yokohama, pp. 231-236.
6. Mesri, G. and Lo, D. O. K., and Karlsrud, K.(1988)."ILLICON settlement analysis of Ellingsrud test fill", *Proc. 2nd Int. Conf. on Case Histories in Geot. Engng.* Missouri, Vol.3, pp.1765-1770.