

단일 및 이중 코어 PBD에 의한 대심도 연약지반 개량 효과에 관한 비교연구

Comparison on the Performance of Soil Improvement in Thick Soft Ground Using Single-Core and Double-Core PBD

양 정 훈¹ Yang, Jeong-Hun

홍 성 진² Hong, Sung-Jin

김 형 섭³ Kim, Hyung-Sub

이 우 진⁴ Lee, Woo-Jin

최 항 석⁵ Choi, Hang-Seok

Abstract

The conventional single-core PBDs have been widely used in order to accelerate consolidation settlement of soft grounds. When using the single-core PBD in a thick clay deposit, a delay of consolidation may occur due to high confining pressure in the thick deposit and necking of drains. This study is to compare the performances of soil improvement by the single-core and double-core PBD installed at a site in Busan New Port which exhibits approximately a 40m-thick clay layer. An in-situ test program was performed at the test site where a set of the double-core PBDs and single-core PBDs were installed to compare the efficiency of each drain. In addition, the discharge capacity of each PBD has been measured using the modified Delft Test. A series of laboratory tests for estimating in-situ soil properties have also been performed in order to obtain input parameters for a numerical program ILLICON. The discharge capacity of the double-core PBD is higher than that of the single-core PBD in the modified Delft Test. However it is observed from the comparative in-situ test and numerical analysis that there is no difference in the performance of ground improvement between the two drain systems. This discrepancy comes from the fact that the amount of water released during consolidation in most common field conditions is much smaller than the capacity of even the single core PBD. And thus, considering actual field conditions, it can be concluded that the single-core PBD has enough discharge capacity even in the thick clay deposit such as this test site.

요 지

단일코어 연직 배수재 공법은 현재까지 폭넓게 사용되는 연약지반 개량공법이다. 그러나 얇은 플라스틱 보드 형태의 PBD 구조로 인해 압밀 도중 큰 횡 방향 토압과 이에 따른 necking 현상이 발생하고 이는 PBD의 통수능을 감소시킨다. 본 연구 대상인 부산신항만 조성 공사현장은 대심도의 연약지반으로서 PBD 설치 시, 큰 횡 방향 토압에 의한 통수능 감소를 예상되어 통수능 감소현상을 극복하기 위하여 이중코어 PBD를 도입, 시공하고, 기존 형태의 단일코어 PBD를 동시에 설치한 후, 현장에서의 배수재 성능을 비교분석하였다. 실내실험으로는 개량 델프트 실험을 수행하여 연직배수재의 통수능을 측정하고, 현장에서 채취한 시료를 이용해 기본 물성실험 및 CRS 압밀실험을 수행하여 수치

1 삼보기술단 지반사업부 주임 (Senior Clerk, Tunnel & Underground Facility Design, Sambo Engr. Co., LTD.)

2 정희원, 고려대학교 건축사회환경공 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil, Environmental and Architectural. Engrg., Korea Univ.)

3 삼성물산 건설부문 북권 2-단계 축조 현장 소장 (Site Manager, Busan New Port North Container Terminal Phase 2-1, Engrg. & Construction, Samsung.)

4 정희원, 고려대학교 건축사회환경공 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural. Engrg., Korea Univ.)

5 정희원, 고려대학교 건축사회환경공 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, Environmental and Architectural. Engrg., Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

해석 프로그램인 ILLICON에 적용하여 침하거동 양상을 파악하였다. 개량 델프트 실험에서는 이중코어 PBD의 통수능이 단일코어 PBD보다 높게 측정되었으나, 현장 계측 및 수치해석에서는 차이가 나타나지 않았다. 이는 일발전인 대심도 지반에서 압밀시 발생하는 물의 배수량은 상대적으로 작은 단일코어 PBD의 통수능 범위 보다도 작기 때문에 실제 현장에서는 단일코어 PBD와 이중코어 PBD의 성능차이가 없음을 확인하였다.

Keywords : Double-core PBD, ILLICON, Prefabricated board drain, Single-core PBD

1. 서론

본 연구 대상인 부산 신항만 조성 공사현장 지역은 준설을 통한 매립지로 두께가 40m 이상인 연약층으로 구성되어 있다. 연구대상 지역에 적용된 연직 배수재 공법은 연약지반 개량공법의 하나로, 연직 배수재를 적용하여 수평 배수거리의 단축을 통해 압밀을 촉진하는 공법이다. 연직 배수재를 중심으로 한 방사형 압밀이론은 Rendulic(1935)과 Carillo(1942)에 의해 일차원 압밀해가 제시되었으며, 이와는 독립적으로 Barron(1944)도 동일한 해를 발표하였다. 이후 Barron(1948)은 교란효과와 배수저항을 고려한 이론해를 제시하였고, 이후 Barron해의 문제점을 수정 보완하여 Yoshikuni(1974), Hansbo(1981), Onoue(1988)등이 개선된 이론해를 발표하였다. 그러나 상기 이론해에서는 배수저항이 일정하다고 가정한 반면, 실제 지반에서는 시간에 따른 배수재의 절곡, 폐색 현상, 횡 방향 토압에 의한 단면감소 등으로 통수능 감소 현상이 발생한다. 특히 본 연구 대상과 같이 대심도 연약지반에 설치한 배수재의 경우 큰 횡 방향 토압이 예상되고, 이는 압밀을 지연시키는 요인으로 작용할 수 있다. 이러한 통수능 감소현상을 고려하여 기존 단일코어 PBD와 코어의 단면 증가를 통해 통수능을 향상시킨 이중코어 PBD를 현장 시험구역에 설치하여 계측 비교하였으며, 실내실험으로는 개량 델프트 실험을 통해 횡 방향 구속압에 따른 통수능을 측정하였다. 또한 CRS 압밀시험을 수행하여 얻어진 데이터를 압밀 수치해석 프로그램인 ILLICON에 적용하여 다양한 배수재의 통수능에 따른 압밀거동 양상을 비교 분석하였다.

2. 배수저항을 고려한 통수능력에 대한 이론적 고찰

방사형 압밀 이론에서 Barron(1944)은 배수재를 통한 배출가능 유량을 무한한 값으로 가정하고 이론해를 제

시하였으나, 실제 배수재의 투수성 및 배출가능 유량은 배수재 중 방향의 통수능에 의해 결정되고, 배수재 내로 유입되는 유량은 지반의 투수계수와 동수경사의 크기에 밀접한 관련이 있다. 배수재의 통수능을 초과하여 간극수가 유입될 경우, 종방향 간극수 배출에 저항이 생기며, 이처럼 간극수가 배출될 때, 배수재가 받는 저항을 배수저항(Well Resistance)이라고 정의된다. Yoshikuni(1974)는 이러한 배수저항요소를 계수 L 로 고려하여 압밀도를 산정하는 식 (1)을 제시하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n) + 0.8L}\right] \quad (1)$$

여기서 $F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$, $L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w}\right)^2$, T_h 는 방사방향 압밀의 시간계수, $n (= d_e/d_w)$ 은 지반의 유효반경과 배수재 직경의 비, k_h 는 지반의 방사방향 투수계수, k_w 는 배수재의 연직투수계수, H 는 배수재의 길이이다.

또한 Mesri와 Lo(1991)에 의하면 배수저항(R)은 통수능(discharge capacity, q_w)에 반비례하고, 지반의 방사방향 투수계수 k_h 와 배수재의 타입길이 H 의 제곱에 비례하는 관계로 표현하고 이는 식 (2)와 같다.

$$R \propto \frac{k_h H^2}{q_w} \quad (2)$$

따라서 배수재를 통한 간극수의 원활한 배출과, 배수저항의 영향을 감소시키기 위해서는 일정 값 이상의 배수재의 통수능력(discharge capacity, $q_w = \frac{Q}{i}$) 또는 배수재의 연직투수계수($k_w = \frac{q_w}{A_w}$)를 반드시 확보해야 한다(Q 는 배수재를 통과하는 배수량, 동수경사 $i[\Delta h/l$ (Δh :수두차, l :배수재 길이)], A_w 는 배수재의 배수 단면적).

실제 지반조건에서 배수재는 주위의 횡 방향 토압에 의해 유로의 단면적이 감소하고, 압밀이 진행됨에 따라

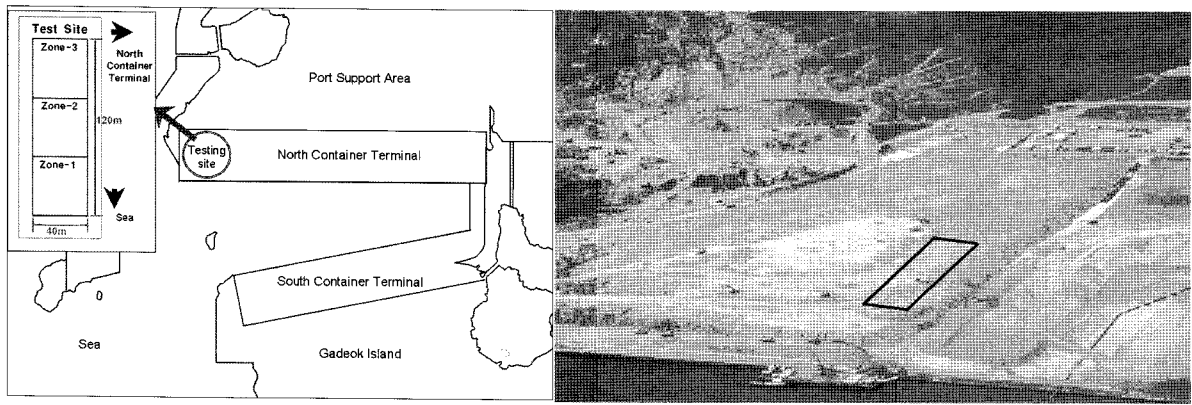


그림 1. 현장 시험 시공현장 위치와 전경

지반변형으로 말미암아 배수재의 흠이나 굴곡 등이 발생하고, 시간이 경과됨에 따라 미세입자에 의해 유로가 막히는 폐색현상(filter clogging)이 나타나 배수재의 전반적인 통수능력이 감소한다. 현장조건에서 발생하는 배수저항에 영향을 미치는 요소들을 고려한 개량 델프트 시험을 통하여 배수재의 통수능을 측정하였다.

3. 현장시험 대상 지반 및 적용한 배수재 조건

3.1 현장시험 대상 지반

현장계측과 실내시험용 시료채취는 부산 신항만 북 컨테이너 터미널의 시험 시공현장에서 수행되었다. 시험 시공현장은 총 3개의 구간으로, 이중 한 구간에 대해 단일코어 PBD를, 두 구간에는 이중코어 PBD를 설치하였으며, 각 구간의 점토층에서 PBD 시공 전 비교란 시료를 채취하여 기본토성시험과 CRS 압밀시험을 실시하였다. 시험 시공현장의 경위도는 구간 2(단일코어 PBD 구간)는 N 35°04'33". E 128°47'56"이고, 구간 3(이중코어 PBD 구간)은 N 35°04'34". E 128°47'56"로, 그림 1은 시험 시공현장의 위치와 전경을 보여준다.

3.2 시험지반의 지층 및 토질 특성

구간 2와 구간 3에서 비교란 시료를 채취하여 기본 토성시험을 실시하였다. 각 구간 심도 10.5m 부터 40.5m까지 2.5m 간격으로 시료를 채취하였고, 기본 토성 시험 결과를 통해 본 과업대상의 점토는 통일분류법상 CL 또는 CH 로 분류 되었다. 그림 2는 자연 함수비 및 액/소성 한계 시험결과로, 깊이에 따라 액성 및 소성지수가 점차로 증가하였다가, Medium Clay층(D.L.-25m)부터

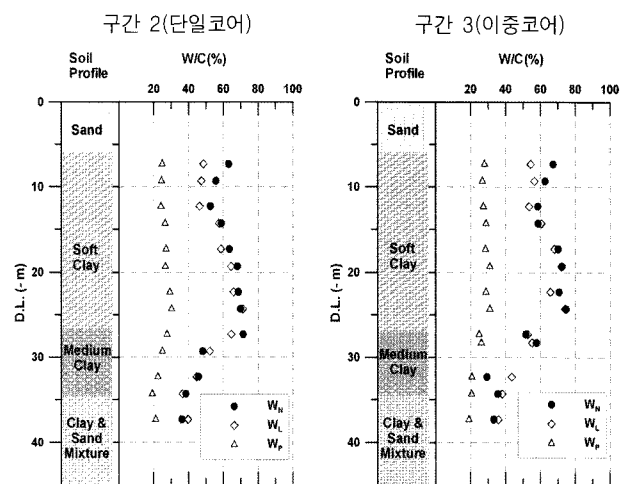
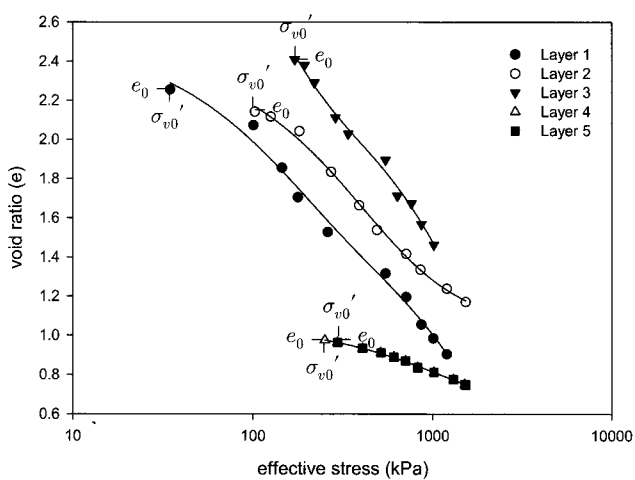


그림 2. 심도에 따른 액/소성 및 현장함수비 분포

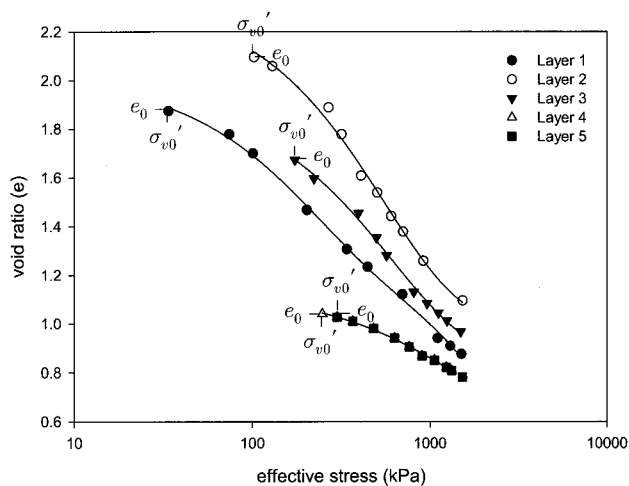
급격히 감소하는 경향을 보인다.

3.3 CRS 압밀시험

각 구간에서 45m 두께의 연약층을 5개의 구간으로 나누어 비교란 시료를 채취하고, CRS 압밀시험을 실시하여 각 층에서의 $e - \log \sigma'_v$ 와 $e - \log k$ 관계를 도출하였다. 5개 층은 지표에서부터 10m두께의 4개 층과 5m두께의 1개 층으로 구분하였다. 그림 3에서와 같이 상부4개 층은 각각 다른 $e - \log \sigma'_v$ 관계를 보이나, 5번째 층은 4번째 층과 유사한 관계를 보였다. 또한, CRS 압밀시험을 통해 상부 30m 두께(즉, 1번째 층에서 3번째 층)의 압축성이 하부 15m 두께(즉, 4번째 층과 5번째 층)보다 현저히 큰 것을 볼 수 있는데, 이 경향은 그림 2에서와 같이 지표로부터 30m 하부에 형성된 Medium Clay와 Clay&Sand Mixture에서의 상대적으로 낮은 액성한계 분포로 설명할 수 있다. 그림 4에서는 $e - \log k$ 관계가

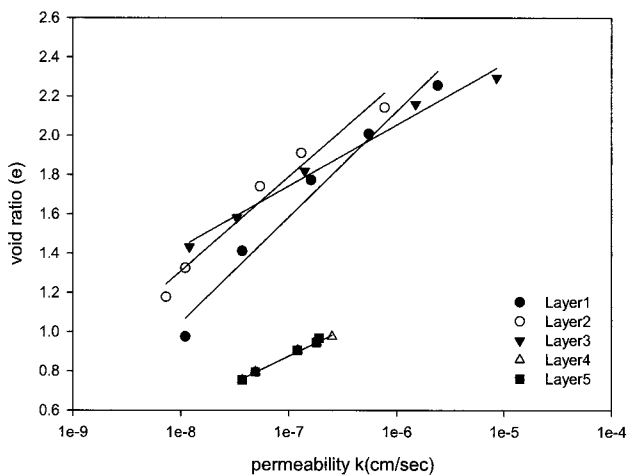


(a) 구간 2(단일코어)

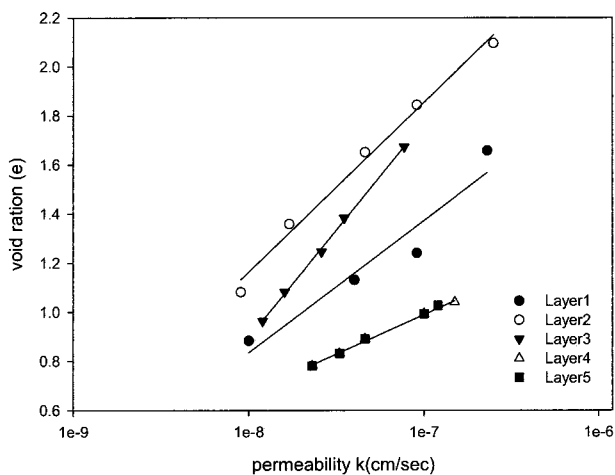


(b) 구간 3(이중코어)

그림 3. $e - \log \sigma_v'$ (간극비-유효응력) 관계



(a) 구간 2(단일코어)



(b) 구간 3(이중코어)

그림 4. $e - \log k$ (간극비-투수계수) 관계

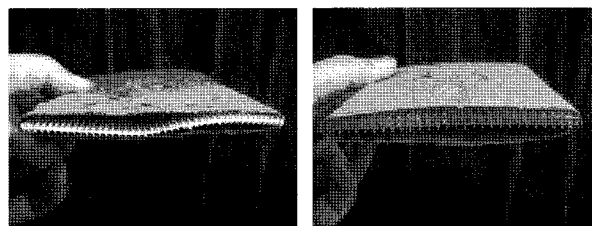
선형으로 간극비가 감소함에 따라 투수계수가 감소함을 보여주고 있다.

4. 사용된 배수재와 통수능 시험

4.1 단일코어 PBD와 이중코어 PBD

본 연구에서는 기존 단일코어 PBD와 이중코어 PBD를 고려하였다. 부산 신항만 시험 시공현장에 3곳의 시험 구간을 선정하여, 구간 1과 구간 3에 이중코어 PBD를, 구간 2에 단일코어 PBD를 설치하여 계측을 수행하였다. 개량 델프트 시험에서도 단일코어, 이중코어 두 종류의 PBD를 사용하여, 현장조건에서의 통수능 평가

를 실시하였다. 단일코어, 이중코어 PBD 모두 하모니카형 코어 구조이며, 이중코어의 경우 단일코어에서 사용된 코어가 이중으로 겹쳐진 형태로 구성되어 있다. 따라



(a) 단일코어 PBD



(b) 이중코어 PBD

그림 5. 연직 PBD 단면 사진과 형상

표 1. 배수재 시험 조건

시험종류	구속압(kPa)	배수재 시험 조건	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

서 이중코어 PBD의 경우 단일코어에 비해 단면적이 크며, 단면 크기는 단일코어 PBD의 경우 97.5mm×3.5mm, 이중코어 PBD는 100.0mm×7.0mm 이다. PBD 단면 형상은 그림 5와 같고, 실내실험에 적용한 배수재 시험 조건은 표 1과 같다.

4.2 개량 델프트 시험

개량 델프트 시험은 기존 델프트 시험기를 개량하여,

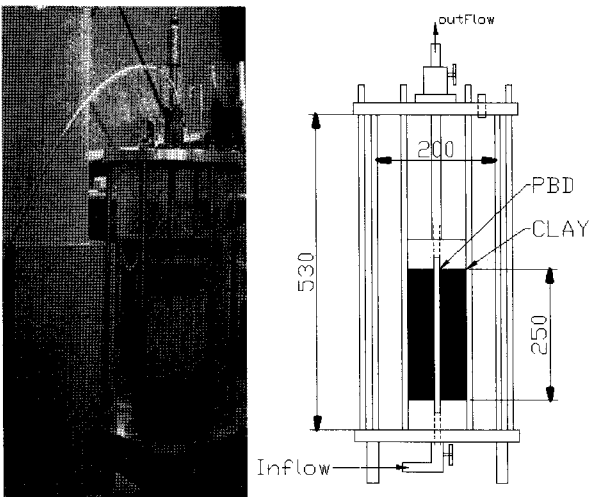


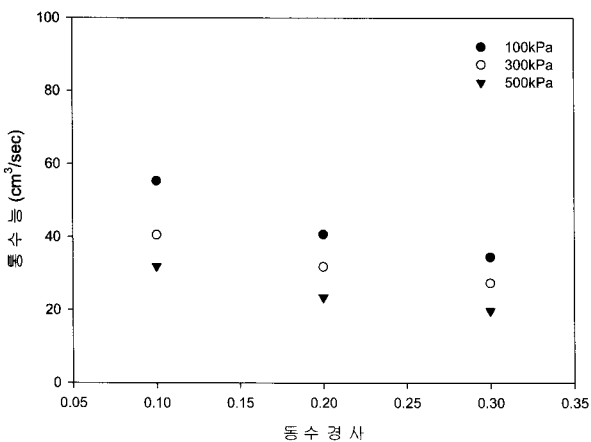
그림 6. 개량 델프트 시험장치와 모식도

멤브레인 안에 PBD와 점토시료를 조성하고 수압을 이용하여 일정 구속압 조건에서 통수능 변화를 측정하는 시험방법이다. 본 연구에서도 구속압에 따른 배수재의 통수능을 측정하기 위하여 개량 델프트 시험기를 적용하였다. 그림 6과 같이 현장상태를 모사하기 위해 PBD와 멤브레인 사이에 현장에서 채취한 시료를 함께 조성하여 PBD 통수능력을 파악하며, 압력조절장치를 이용한 구속압의 변화와 배수재의 상하부에 연결된 수조를 이용한 동수경사변화, 그리고 시간에 따른 통수능을 측정하였다.

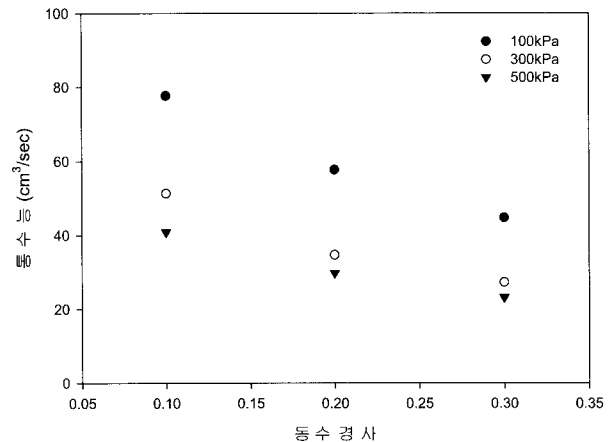
4.3 통수능 시험 결과

4.3.1 구속압과 동수경사에 따른 통수능 변화

본 연구에서는 단일코어 PBD와 이중코어 PBD에 대하여 구속압 100kPa, 300kPa, 500kPa 조건과 배수재의 종 방향 동수경사를 0.1, 0.2, 0.3을 각각 적용하여 통수능 시험을 수행하여 그림 7과 같은 결과를 얻었다. 각 구속압 조건에서 동수경사가 증가하면 통수능은 감소하고, 동수경사 증가로 인한 통수능 감소 정도는 동수경사 0.1에서 0.2사이의 감소폭이 0.2에서 0.3에서 통수능 감소폭보다 크게 측정되었다. 또한 일정 동수경사 조건



(a) 단일코어 PBD



(b) 이중코어 PBD

그림 7. 동수경사에 따른 통수능 시험 결과

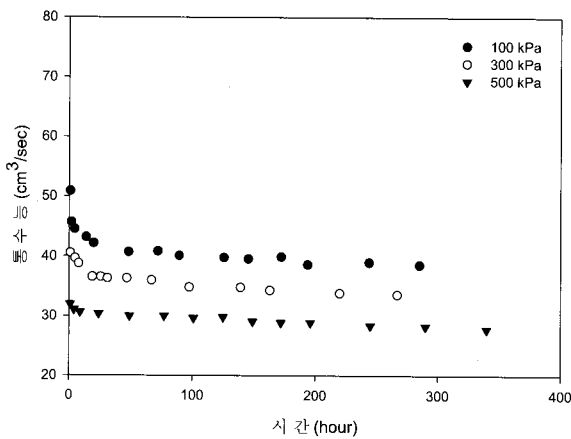
에서는 구속압이 증가할수록 통수능이 감소하였고, 이중코어 PBD 통수능과 단일코어 PBD 통수능을 비교하여 보면, 이중코어 PBD의 단면적이 더 크므로 동일한 구속압과 동수경사가 적용될 때, 이중코어 PBD의 통수능이 더 크게 측정되었다. 또한 구속압이 100kPa에서 500kPa로 증가할 때 이중코어 PBD는 50%정도 단일코어 PBD는 45%정도 통수능 감소가 발생하였다. 그러나 구속압이 300kPa에서 500kPa로 증가할 때 이중코어 PBD는 10%정도, 단일코어 PBD는 20%정도 통수능 감소가 발생하였다. 이중코어 PBD는 300kPa 이상의 높은 구속압에서 통수능 감소가 작으며, 대심도의 높은 구속압에서 이중코어 PBD 통수능이 단일코어 PBD에 비하여 우수한 것으로 나타났다.

4.3.2 시간에 따른 통수능 변화

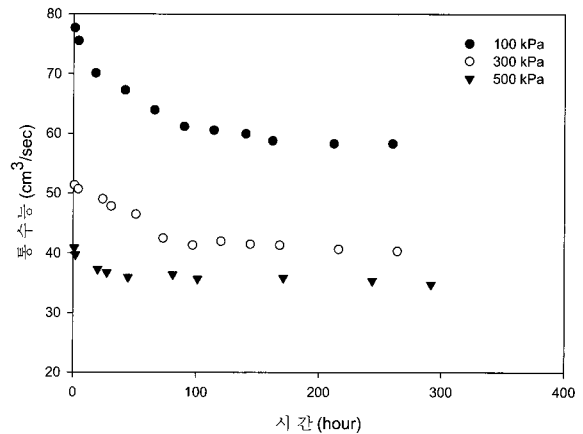
단일코어 PBD와 이중코어 PBD에 대하여 동수경사

를 0.1로 고정하고, 구속압 100kPa, 300kPa, 500kPa 조건에서 12일간 통수능 시험을 하였다. 그림 8은 시간에 따른 PBD의 통수능 변화를 나타내고 있다. 그림 9는 시간에 따른 통수능 변화를 초기 통수능으로 정규화한 그래프이다. 동일한 구속압 조건에서 이중코어 PBD의 통수능이 단일코어 PBD보다 약 40%에서 50% 정도 컸으며, 이중코어 PBD의 초반 통수능이 단일코어 PBD에 비하여 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 그리고 구속압에 따른 통수능은 이중코어 PBD의 경우 300kPa와 500kPa 구속압에서의 통수능 차이가 100kPa와 300kPa 통수능 차이보다 컸다.

또한 단일코어 PBD와 이중코어 PBD의 장기간 통수능 변화를 파악하기 위하여 동수경사 0.1 조건에서 40일간 통수능을 측정하였다. 또한 대심도 현장조건에서의 통수능 감소 현상을 모사하기 위하여 500kPa의 높은 구속압을 적용하여 시험을 수행하였다. 그림 10(a)에서 이

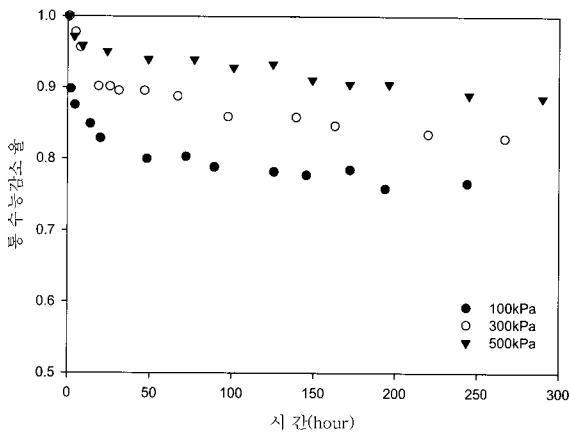


(a) 단일코어 PBD

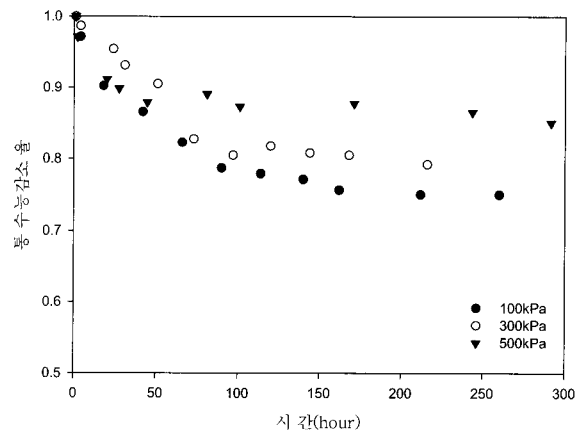


(b) 이중코어 PBD

그림 8. 시간에 따른 통수능 변화

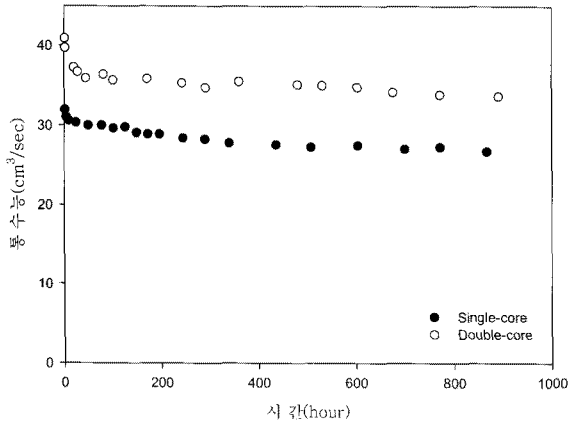


(a) 단일코어 PBD

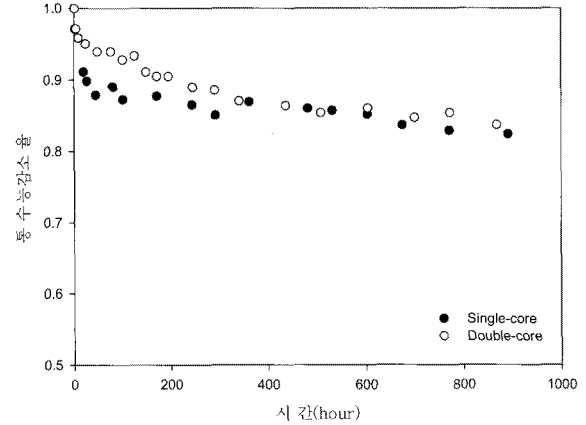


(b) 이중코어 PBD

그림 9. 시간에 따른 통수능 변화(정규화)



(a) 시간에 따른 통수능



(b) 시간에 따른 통수능(정규화)

그림 10. 단일코어 PBD와 이중코어 PBD의 장기 통수능 변화

중코어 PBD는 100시간 정도까지 통수능이 크게 감소하고 이후에는 통수능 감소가 적었으며, 단일코어 PBD는 24시간 정도까지 통수능이 크게 감소하고 이후에는 통수능 감소가 적게 발생하였다. 이중코어 PBD가 단일코어 PBD에 비하여 시간에 따른 통수능의 감소량은 컸다. 그러나 그림 10(b)에서 초기 통수능으로 정규화한 통수능 그래프를 보면 통수시험 후 비교적 초반부인 200시간 이내에서는 단일코어 PBD 통수능 감소가 크게 발생하였고, 400에서 500시간 범위에서는 초기 통수능에 대한 두 PBD 통수능 감소 정도가 비슷하였다.

하였다. ILLICON 프로그램은 SKA-EDEBY Test Fills (스웨덴), CHANGI Airport-Runway(싱가포르), CHANGI Airport-Sia Hangar(싱가포르), CHEK LAP KOK Replacement Airport(홍콩)의 4개 현장에서 총 24개 시험구역에 대한 해석과 계측 비교를 통하여 ILLICON 프로그램의 신뢰성이 검증되었다(Lo, 1991; Mesri 등, 1988). ILLICON은 단계적인 성토에 의한 하중재하 스케줄을 적용할 수 있고, 배수재가 점토층에 전체관입될 경우와 부분관입될 경우에 대해 해석이 가능하며, 배수재의 설치시기, 스미어존을 해석에 고려할 수 있다.

5. 수치해석

5.1 ILLICON 압밀해석 프로그램

Mesri와 Rokhsar(1974)는 일차원 압밀이론에서 $e - \log \sigma'_v$ 와 $e - \log k_v$ 를 적용한 연직 배수재에 대한 압밀이론을 발전시켰다. 이후 Mesri와 Choi(1985)는 다층으로 구성된 지반에 대한 압밀해석과 단계성토 시공조건을 모사할 수 있도록 시간에 따른 하중재하 방법을 적용하여 압밀해석이론을 제시하였고, 이를 이차원 축대칭 모델에 적용하여 ILLICON 압밀수치해석 프로그램을 개발

5.2 ILLICON 압밀해석 조건

본 연구에서 사용된 ILLICON 프로그램은 배수재의 투수계수, 지반과 배수재의 기하학적 배치조건, 그리고 각 층의 $e - \log \sigma'_v$ 와 $e - \log k$ 관계가 입력 값으로 필요하다. PBD가 설치된 각 구간의 해석조건은 표 2와 같고, 배수재 설치시기, 하중 재하 스케줄에 따른 시공 단계는 표 3과 같다. 배수재의 통수능은 개량 델프트 시험결과를 이용하여 환산직경에 따른 투수계수를 산정하고, 단일코어 PBD는 $30\text{cm}^3/\text{sec}$, 이중코어 PBD는 $40\text{cm}^3/\text{sec}$ 의 통수능을 적용하였다. 실제 두 배수재 통수능 값 외에도

표 2. ILLICON해석 시 해석조건

분류	두께 (m)	k_h/k_v	층수	배수재 설치깊이 (m)	유효반경 (m)	배수재 환산직경 (cm)	상·하부 배수조건	배수재 설치일 (일)	배수재 투수계수 (cm/sec)
구간 2 (단일코어 PBD 구간)	45	1.0	5	40	1.13	3.326	모두 배수	120	3.452
구간 3 (이중코어 PBD 구간)	45	1.0	5	40	1.13	5.424	모두 배수	130	1.731

표 3. 현장 시공 스케줄

구 분	일 시	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 ^{*1)} /130 ^{*2)}	-	-	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) : 구간 2 PBD 설치일

*2) : 구간 3 PBD 설치일

표 4. ILLICON 해석에 적용된 배수재 조건

분 류	구간 2(단일코어)				구간 3(이중코어)				
	1	10	20	30	1	10	20	30	40
통수능(cm ³ /sec)	1	10	20	30	1	10	20	30	40
투수계수(cm/sec)	0.115	1.151	2.301	3.452	0.043	0.433	0.866	1.298	1.731

표 4에서와 같이 다양한 통수능에 따른 압밀해석을 수행하여 통수능 감소에 따른 압밀속도 감소를 예측하였다.

6. 현장 계측 및 결과 분석

6.1 현장 계측과 방법

시험 시공현장 3개 구간 중 2개 구간에 대하여 시간에 따른 지표 및 층별 침하량과 과잉 간극수압을 측정하

였다. 계측은 최초 모래매트 포설 후, 130일 이후부터 측정을 시작하였다. 이는 현장 여건상 계측기 설치가 PBD 타설 이후에 설치가 가능했기 때문에 공사 초기부터 계측이 이루어지지 못했다. 그림 11은 각 계측기를 설치한 심도별 위치이다.

계측은 현장 여건상 모래매트를 포설한 시점을 기준으로 130일 이후부터 수행되었고, 구간 2와 구간 3에서의 계측된 침하량은 그림 12(a)와 같다. 계측은 130일부터 시작하여 630일 까지 500일간 수행되었고, 최종침하량은 구간 2는 5.44m, 구간 3에서는 4.87m로 측정되었다. 두 구간의 침하량 차이는 배수재 성능차이기 보다는 두 시험 구간의 점토층 두께 및 압축성의 차이임을 유추할 수 있고, 이를 확인하기 위해 두 구간의 침하량을 정규화 하여 비교하였을 때, 그림 12(b)에서와 같이 매우 유사한 침하속도를 보여주었다.

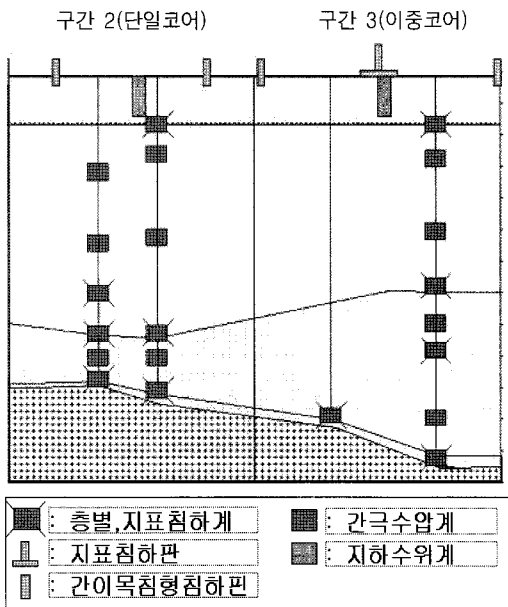


그림 11. 현장 계측기 위치도

6.2 ILLICON 해석결과 및 계측값 비교

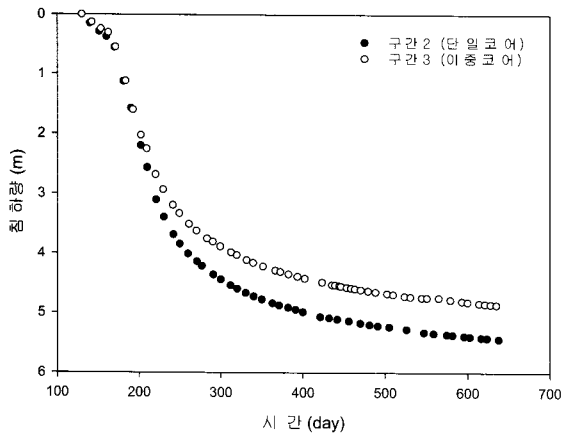
본 연구에서 계측된 침하량은 모래매트 포설 후 130일 이후부터 측정한 값으로 계측기 설치 전 130일 동안의 침하량은 측정할 수가 없었다. 따라서 계측 이전 130일 침하량을 ILLICON 수치해석을 통하여 구하고, 해석된 침하량을 130일의 실제 지반 침하량으로 간주하여 누적한 계측 침하량과 수치해석 결과를 비교 분석하였다. 표 5는 ILLICON 수치해석에 고려된 층별 침하량과 간극수압의 계측 위치를 나타낸다.

실제 현장에서는 배수재 설치로 인해 배수재 주변에 교란구간(smear zone)이 발생하여, 교란구간에서 지반의 압축성 및 투수계수가 변화되어 압밀침하거동에 영향을 줄 가능성이 있으나, 현재까지 교란영역에 대한 압축성과 투수계수 변화에 대한 연구정도가 충분하지 않아 교란영역 설정 및 교란영역에서의 지반의 물성치 산정에 많은 어려움이 따르고 있다. 본 연구에서도 교란영역을 적용하지는 않았으나, 예비 수치해석 결과가 계측값과 상당히 유사함을 나타내고 있어 본 연구에서는 교란효과(smear effect)를 고려하지 않고 수치해석을 수행

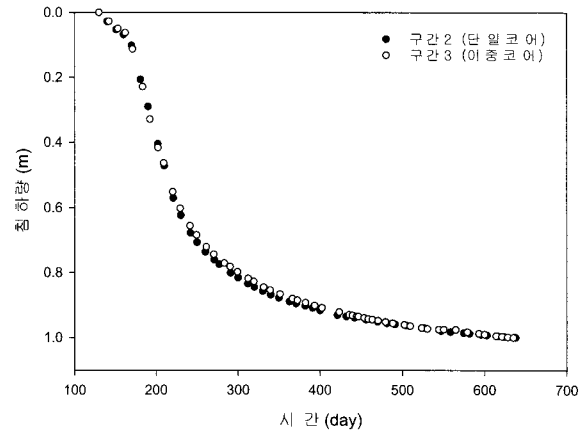
하였다.

6.2.1 침하량 비교

총 지표 침하량의 경우 그림 13과 같이 구간 2에서는 단일코어 PBD 설치일인 120일에 침하량이 0.99m에서부터 6.43m까지 시간에 따른 침하량을 보여주고, 구간 3에서는 이중코어 PBD 설치일인 130일에 침하량이 0.169m에서 시작하여 5.036m까지 침하되었다. 구간 2, 구간 3의 계측결과와 ILLICON 프로그램의 해석결과가 총 침하량의 경우 매우 유사함을 보이며, 본 시험 시공현장에



(a) 침하량

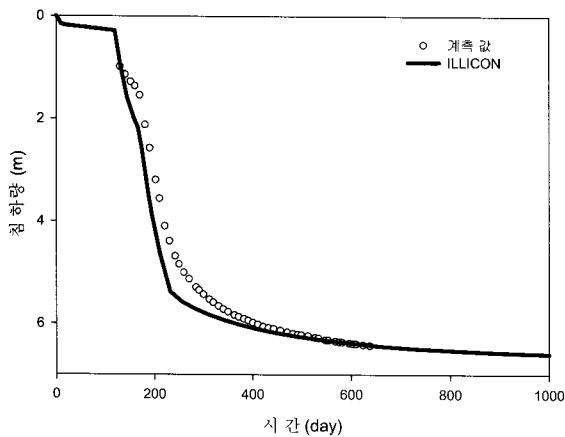


(b) 침하량(정규화)

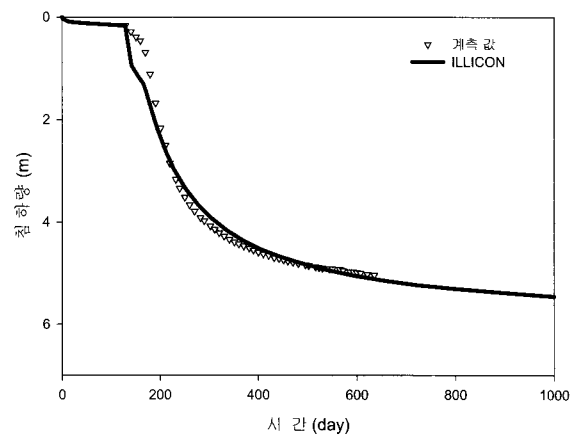
그림 12. 시간에 따른 지표 침하곡선

표 5. 해석에 고려된 계측 위치

구분		계측기 설치 위치(ILLICON 해석 층)			
구간 2 (단일코어 PBD 구간)	총별침하량	DL(-)3.0m	DL(-)36.9m	DL(-)45.0m	
	간극수압	DL(-)7.0m	DL(-)39.5m		
구간 3 (이중코어 PBD 구간)	총별침하량	DL(-)3.2m	DL(-)28.2m	DL(-)38.9m	DL(-)56.5m
	간극수압	DL(-)8.0m	DL(-)21.0m	DL(-)34.5m	



(a) 구간 2(단일코어)



(b) 구간 3(이중코어)

그림 13. 총 침하량 계측값과 ILLICON해석 값 비교

서의 비교 결과에서는 총침하량 산정의 경우 ILLICON 프로그램이 상당한 정확성을 보여주고 있다.

구간 2와 구간 3에서 각 층에 층별 침하계를 설치하였으며, 각층의 침하량을 ILLICON 해석에서 계산된 층별 침하량과 비교하여 그림 14와 그림 15와 같은 결과를 얻었다. 구간 2의 깊이 0.0m에서 5.0m 구간에 대한 침하량은 630일 기준으로 5.749m 발생하였고, ILLICON 수치해석을 통해 얻어진 침하량은 6.334m로 수치해석에서의 침하량이 약 0.6m 크게 산정되었다. 깊이 35.0m에서 40.0m 구간에서 발생한 침하량은 계측값은 630일에 0.401m를 기록했고, ILLICON에서의 침하량은 0.339m로 상부층과는 반대로 계측값이 0.06m 정도 큰 침하량을 보여준다. 구간 3에서는 깊이 0.0m에서 5.0m 구간에서 4.985m의 침하량이 계측되었고, ILLICON 수치해석 침하량은 5.065m로 수치해석 값이 약 0.1m 크게 산정되어졌다. 깊이 25.0m에서 30.0m 구간에서의 침하량은 0.806m로 계측되었으며, ILLICON 수치해석에서의 침하량은 1.011m로 계측값보다 약 0.2m 크게 계산되었다. 깊이 35.0m에서 40.0m 구간에서의 침하량은 계측값은 0.299m, ILLICON 해석값은 0.325m로 수치해석 값이 0.03m 정도 크게 계산되었다. 계측값과 수치해석의 층

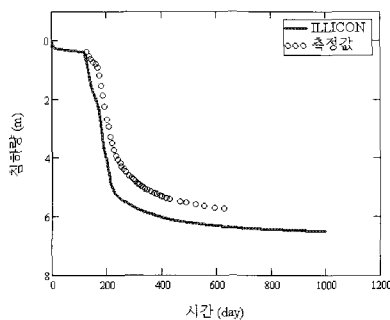
별 침하량은 총 침하량 경우에 비해서 결과가 다소 차이를 보임을 알 수 있다.

6.2.2 간극수압 비교

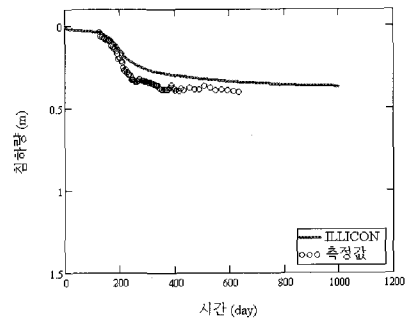
구간 2와 3에서 계측된 간극수압과 ILLICON 프로그램에서 해석된 간극수압 값을 각각 비교하였다. 간극수압계, 배수재로부터의 이격거리에 따라 배수거리 차이로 인한 간극수압이 현저히 다르게 계측될 것이다. 앞서 언급했듯이 간극수압계는 PBD 타설 후에 설치되어, 현장에서 간극수압계와 배수재의 정확한 이격 거리를 알 수 없다. 따라서 ILLICON 해석에서 배수재로부터 방사 방향으로 이격거리에 따라 해석 격자를 세분하여 해석을 수행하고, 각 격자에서 계산된 간극수압 결과를 계측값과 비교하여 거동 양상이 유사한 지점에 계측기를 설치했다고 가정하고 이를 계측값과 비교하였다. 각 층의 간극수압 비교 결과는 아래 그림 16과 그림 17에 나타나 있다.

6.3 통수능 변화에 따른 침하량 비교

앞서 단일코어 PBD를 설치한 구간 2와 이중코어 PBD

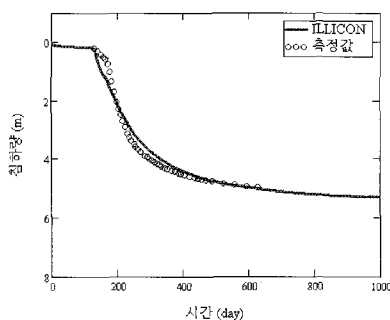


(a) 0.0m~5.0m

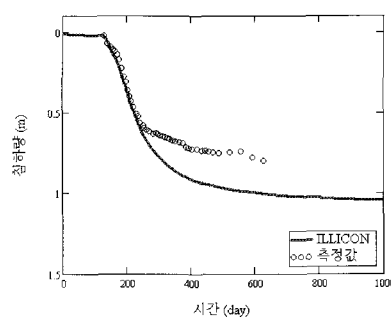


(b) 35.0m~40.0m

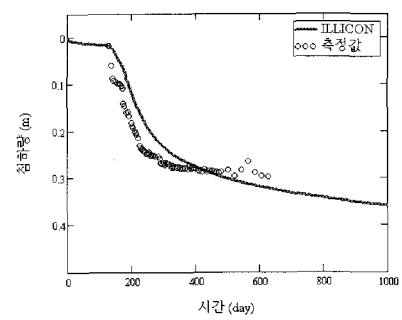
그림 14. 구간 2(단일코어 PBD 구간)에서의 층별 침하량



(a) 0.0m~5.0m



(b) 25.0m~30.0m



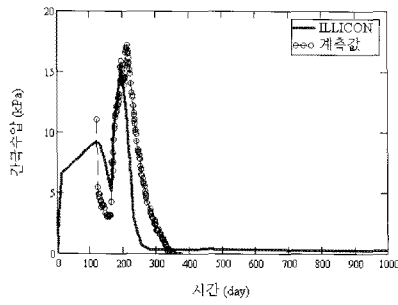
(c) 35.0m~40.0m

그림 15. 구간 3(이중코어 PBD 구간)에서의 층별 침하량

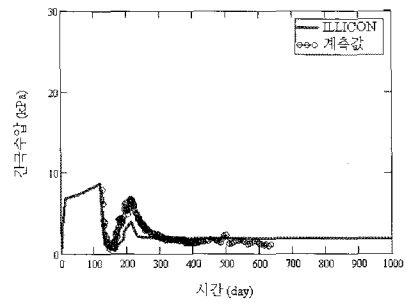
를 설치한 구간 3에서 ILLICON 해석결과와 실제 계측 값을 비교하였다. 배수재를 적용한 두 구간의 침하량 차이는 지반 자체의 압축성 차이로 판단되며, 배수재의 통수능 차이에 의한 효과를 정확히 파악하기 어렵다. 이번 장에서는 실내시험을 통해 예측된 배수재의 통수능 이외에 임의의 통수능 값들을 ILLICON 해석에 적용하여 침하거동에 배수재의 통수능이 미치는 영향을 살펴보았다.

그림 18은 표 4와 같이 배수재의 통수능을 임의로 변화

시켜 얻은 수치해석 결과이다. 구간 2와 구간 3 모두 배수재의 통수능을 개량 델프트 시험 결과에서 얻어진 통수능(단일코어 경우는 $30\text{cm}^3/\text{sec}$, 이중코어 경우는 $40\text{cm}^3/\text{sec}$)에서부터 $1.0\text{cm}^3/\text{sec}$ 까지 감소시키면서 비교하였다. 시간에 따른 통수능 감소를 모사하기 위해서는 시간에 따라 배수재의 단면적과 투수계수를 변화시켜야 하나, ILLICON 프로그램에서의 배수재 단면적과 투수계수는 초기값으로 결정되어 해석도중 변하지 않으므로 현장상태를 정확히 모사하는데 한계가 있다. 해석한 결과, 단일코어

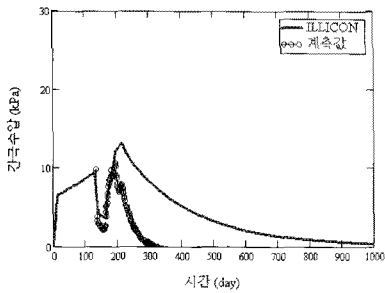


(a) DL(-)7.0m

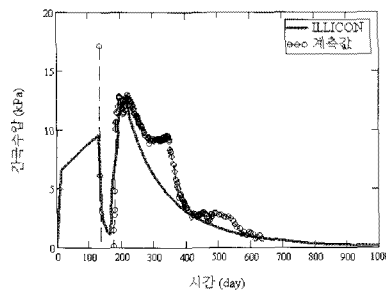


(b) DL(-)39.5m

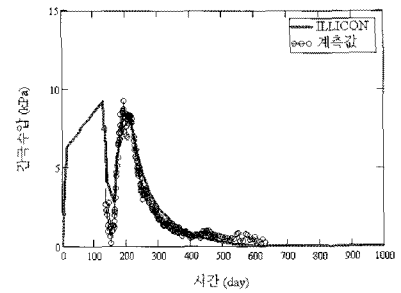
그림 16. 구간 2(단일코어 PBD 구간)에서의 총별 간극수압



(a) DL(-)8.0m

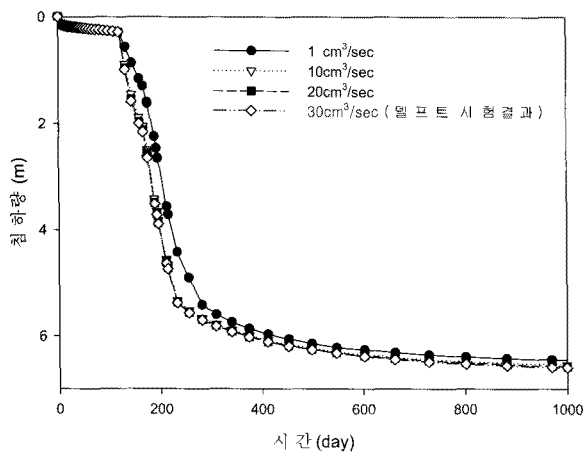


(b) DL(-)21.0m

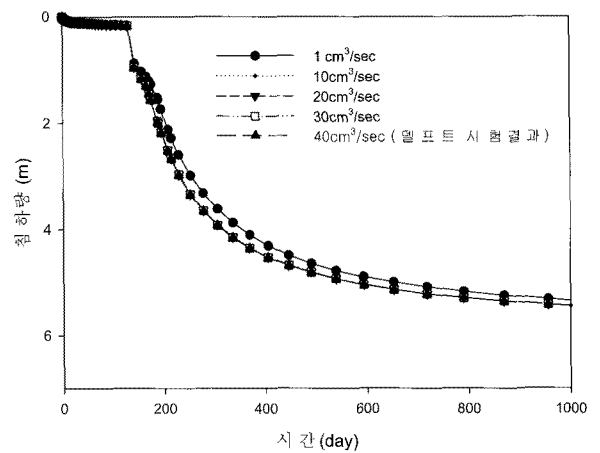


(c) DL(-)34.5m

그림 17. 구간 3(이중코어 PBD 구간)에서의 총별 간극수압



(a) 구간 2 (단일코어)



(b) 구간 3 (이중코어)

그림 18. 배수재 통수능에 따른 침하거동

및 이중코어 PBD의 투수계수를 감소시켜 초기 통수능을 $10\text{cm}^3/\text{sec}$ 까지 줄이더라도 전체 침하 거동에는 영향을 미치지 않았으나, 다만 통수능을 $1.0\text{cm}^3/\text{sec}$ 까지 줄인 경우에 침하속도 차이를 확인 할 수 있었다. 이는 앞서 해석에 적용된 단일코어 PBD와 이중코어 PBD의 통수능 값 $30\text{cm}^3/\text{sec}$ 와 $40\text{cm}^3/\text{sec}$ 에 비하여 매우 작은 값으로 두 종류의 PBD 모두 대심도에서 적용할 수 있는 충분한 여유 통수능을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Hansbo(1997)가 언급한 바와 같이 일반적으로 사용되어지는 배수재들은 충분한 통수능을 유지하며, 배수저항을 무시할 수 있다는 내용에 부합된다. 특히, 이중코어 PBD뿐만 아니라 단일코어 PBD도 본 시험 시공현장과 같은 대심도 연약지반 개량에 별다른 PBD 성능저하 없이 사용이 가능함을 보여준다.

7. 결론 및 고찰

본 연구의 대상은 부산 신항만 북컨테이너 터미널 시험시공 현장으로 연약지반의 두께가 40m에서 50m에 이르는 대심도 현장이다. 따라서 일반적인 연약지반 개량 시공현장에 비해 PBD 타설 심도가 깊어 높은 횡방향 토압이 발생하는 현장특성 때문에 토압으로 인한 PBD의 통수능 감소를 연구대상으로 하였다. 본 연구에서는 이중코어 PBD와 단일코어 PBD의 성능비교평가를 위하여 일련의 실내시험과 현장 계측, 현장조건을 적용한 수치해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실내시험을 통하여 배수재 자체의 통수능을 산정하기 위하여 동수경사, 구속압, 시간의 영향을 고려할 수 있는 개량 델프트 실내시험을 수행하였다. 개량 델프트 시험결과 모든 경우에서 단일코어 PBD보다 이중코어 PBD의 통수능이 크며, 특히 높은 구속압에서도 이중코어 PBD가 단일코어 PBD보다 뛰어난 배수능력을 보였다. 따라서 실내시험 결과로 미루어 대심도 지반에서도 이중코어 PBD가 단일코어 PBD 보다 높은 배수능력을 보일 것으로 예상된다.
- (2) 시험시공현장 구간 2(단일코어 PBD 설치)와 구간 3(이중코어 PBD 설치)에 계측기를 설치하여 침하량과 간극수압을 측정하고, 두 구간의 압밀거동현상을 비교분석하였다. 두 구간의 침하량 계측에서 차이가 나타났으나, 침하량을 정규화 하여 검토하

였을 경우 두 구간에서의 압밀속도는 동일하게 나타났다.

- (3) 실제 시험시공 현장의 압밀거동과 수치해석 결과에서, 총 침하량 값에 있어 실제 계측값과 유사함을 보이고 있어 본 연구대상지반에서 ILLICON 프로그램이 압밀해석에 적용성이 있다고 판단된다.
- (4) 배수재의 통수능에 따른 압밀거동 해석에서는 침하량 해석 결과에서, 개량 델프트 시험에서 산정한 배수재의 통수능(구간 2에서 $q=30\text{cm}^3/\text{sec}$, 구간 3에서 $q=40\text{cm}^3/\text{sec}$)값에서는 차이를 보이지 않고 있으며, 통수능을 지속적으로 감소시켜 두 구간 모두 $1.0\text{cm}^3/\text{sec}$ 까지 감소하였을 때 침하속도에서 차이가 발생하였다. 따라서 $1.0\text{cm}^3/\text{sec}$ 이하의 통수능이 적용되었을 경우 배수저항이 발생하였음을 알 수 있고, 현장 또는 수치해석에서의 배수재를 통해 유입되는 유량이 약 $1.0\text{cm}^3/\text{sec}$ 정도임을 유추할 수 있다.

결과 1에서와 같이 개량 델프트 시험에서는 이중코어 PBD가 단일코어 PBD 보다 높은 통수능 값을 측정되었으나, 결과 2에서는 현장 계측값에서 차이가 나타나지 않았고, 이는 결과 4에서 보듯이 실제 배수재를 통한 배수량이 배수재 자체의 통수능의 1/10~1/100 정도라는 사실에 기인한다. 따라서 배수재의 통수능이 배수량에 비해 상당히 큰 값을 보유하는 경우에는 전체 압밀속도에 영향을 미치지 않음을 판단할 수 있으며, 단일코어 PBD만으로도 충분한 통수능력을 유지하며 대심도 연약지반 개량이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 건설부문의 지원으로 대심도 연약지반 개량을 위한 이중코어 PBD 성능연구 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Barron, R. A. (1944), "The Influence of Drain Wells on the Consolidation of Fine-Grained Soils", *Diss. Providence, U.S. Engineering Office.*
2. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", *Transactions ASCE, Vol.113, Paper No.2346, pp.718-742.*
3. Carlio, N. (1942), "Simple Two and Three Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils", *Journal of Mathematics and Physics, Vol.21, No.1, pp. 11-18.*

4. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol.3, pp. 677-682.
5. Hansbo, S. (1997), "Aspects of vertical drain design; Darcian or non-Darcian flow", *Geotechnique* 47, No.5, pp.983-992.
6. Lo, D. O. K. (1991), Soil improvement by vertical drains, Doctor thesis, University of Illinois.
7. 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.
8. 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.
9. Rendulic, L. (1935), "Der Hydrodynamische Spannungsausgleich in Zentral Entwässerten Tonzylindern", *Wasserwirtsch. U. Tech.*, Vol.2, pp.250-253; 269-273.
10. Onoue, A. (1988a), "Consolidation of Multilayered Anisotropic Soils by Vertical Drains with Well Resistance", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.3, pp.75-90.
11. Yoshikuni, H., and Nakanodo, H. (1974), "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, pp.35-46.

(접수일자 2009. 2. 16, 심사완료일 2009. 8. 24)