

코어형태에 따른 연직배수재의 압밀도 분석

Analysis of PVD Degree of Consolidation with Various Core Types

신 은 철^{1*} Shin, Eun-Chul
김 성 환² Kim, Sung-Hwan
잔나라 나자로바³ Zhanara Nazarova

ABSTRACT

Recently, the demand for industrial and residential land are increasing with economic growth, but it is difficult to acquire areas for development with good ground condition. For efficient and balanced development of land, new development projects are being carried out not only the areas with inland but those with the soft ground as well. As soft grounds have complex engineering properties and high variations such as ground subsidence especially when their strength is low and depth is deep, we need to accurately analyze the engineering properties of soft grounds and find general measures for stable and economic design and management. Vertical drain technology is widely used to accelerate the consolidation of soft clay deposits and dredged soil under pre-loading and various types of vertical drain are used with there discharge capacity. Under field conditions, discharge capacity is changed with various reason, such as soil condition, confinement pressure, long-term clogging and folding of vertical drains and so on. Therefore, many researcher and engineer recommend the use of required discharge capacity. In this paper, the experiment study were carried out to obtain the discharge capacity of six different types of vertical drains by utilizing the large-scale model tests and discharge capacity, degree of consolidation with the time elapsed.

요 지

최근 경제가 성장함에 따라 산업지역과 거주지의 요구가 증가하고 있다. 그러나 양질의 지반상태 지역을 구하기가 어렵다. 경제적이고 균형적인 지역 발전을 위하여 내륙지역 뿐만 아니라 연약지반에도 새로운 프로젝트가 수행되고 있다. 연약지반은 복잡한 공학적 특성과 강도가 낮고 대상 지역의 심도가 깊은 많은 변수를 가지고 있기 때문에 연약지반의 공학적 특성을 정확하게 분석하고 안정적인 계측과 경제적인 설계와 관리방법을 찾는것이 필요하다. 연직배수공법은 프리로딩과 통수능력을 가진 여러 종류의 배수재를 사용하여 연약지반과 퇴적지반의 압밀촉진을 위하여 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 6가지 코어형태의 연직배수재의 대형통수능력 시험을 수행하고 시간 경과에 따른 통수능과 압밀도를 분석하였다.

Keywords : PVD, Core type, Degee of consolidation, Discharge capacity, Time elapsed

1. 서 론

일반적으로 연약지반의 압밀에 소요되는 시간을 단축시키기 위해 연직배수공법이 많이 사용되고 있다. 이러한 연직배수공법의 종류는 배수재로써 모래를 이용하는 Sand Drain, 모래를 자루에 담은 Pack Drain, 종이와 플라스틱

등의 인공배수재를 쓰는 PVD(Prefabricated Vertical Drain) 등으로 대별된다. 이들 중 Plastic Board Drain은 경제성, 시공성 및 효율성 측면에서 긍정적으로 평가되고 있고, 시공장비의 발달로 인해 해상에서도 시공이 가능하며, 타설 심도 또한 점차적으로 증가하여 약 50m 이상의 심도까지도 시공된 사례도 있다. 최근에는 기존의 석유화학 재료를

1* 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 (Member, Professor, Civil & Environmental System Eng., University of Incheon, E-mail: ecshin@incheon.ac.kr)
2 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정 (Member, M.S.Student, Civil & Environmental System Eng., University of Incheon)
3 비회원, 유라시아국립대학 지반공학연구소 박사과정 (Ph.D.Student, Geotechnical Institute, Eurasian National University, Kazakhstan)

사용한 PBD와는 달리 천연섬유를 이용함으로써 배수재의 기능을 다한 후에 소정의 기간이 경과하면 지중의 박테리아에 의해 분해되어 최종적으로 흙과 동화하는 환경친화적인 특성을 가진 Fiber Drain의 활용성도 검토되고 있다. 또한, 배수재의 형상을 원형으로 하고 부직포로 감싸는 형태의 Cylindrical Drain공법의 활용실적 또한 현저하게 나타나고 있으며, 원형배수재의 원료를 보다 친환경적인 소재를 이용함으로써 배수재의 기능이 다한 후에도 주변 환경에 영향을 미치지 않도록 하고자 하는 다각적인 검토가 이루어지고 있다(농어촌연구원, 2006).

연약지반 개량을 위한 연직배수공법 중, Terzaghi의 일차원압밀이론을 기초로 한 샌드 드레인 공법은 1926년 미국 기술자 Moran에 의해 개발되어 미국 캘리포니아주에서 최초로 시공되었고, 그 후 Barron(1948)에 의해 이론적 해석법이 확립되면서 세계적으로 가장 널리 이용되었으며, 현재까지도 Barron의 압밀이론에 기초를 두고 설계가 이루어진다.

연직배수공법은 압밀촉진공법 중의 대표적인 공법중 하나로 하중에 의해 발생된 지반 내의 과잉간극수압을 빨리 소산시키기 위해 지반에 배수재를 타입함으로써 배수 거리를 단축시켜 압밀을 촉진하는 공법이다. 그러나 연약 지반에 연직배수공법을 적용하는 경우에는 지반의 구속압에 의한 배수재의 체적감소와 지반침하에 의한 배수재의 변형 등의 이유로 배수저항이 발생하는 경우가 있으며, 이러한 문제점은 연약지반의 압밀지연을 유발하여 건설공사에 큰 문제점으로 작용할 수 있다. 따라서 연직배수공법에서의 배수재는 배수재로서의 적합성 여부가 연약지반의 압밀침하에 영향을 미치는 중요한 요인이라 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 연직배수공법에서 배수재의 통수능력에 영향을 주는 압밀도에 대한 기존의 연구자료를 고찰하여 해안 매립 지역의 시료를 대상으로 압밀을 지연시키지 않는 연직배수재의 시간에 따른 압밀도를 결정하였으며, 설계단계에서 검토중에 있는 일반형 PBD, 대심도 용 PBD, 실린더형 PBD, PCD(Φ32mm), X형코어 PBD, 이중코어 PBD배수재 각각에 대한 다양한 조건에서의 복합통수능시험을 통해 통수능력과 압밀도 평가를 수행하였다.

2. 배수저항을 고려한 압밀해석방법

전체의 평균압밀도에 대한 근사식은 다음과 같은 식과 같다.

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

여기서, U : 압밀도, T_h : 수평압밀계수, $F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$, L (웰저항)이 커지면 압밀도가 작아진다. 즉 점토의 투수계수가 커지면 웰저항은 커지며 압밀도는 작아진다(PBD n 값 = 30~40). 단, 웰저항의 영향을 무시하고 설계한다면 지나치게 낙관적인 결과를 얻게 되고 웰저항에 가장 큰 영향을 주는 것은 간극수 중에 용존된 공기(기포)이다.

2.1 Hansbo의 해

Hansbo(1979)가 제안한 스미어와 배수재의 웰저항을 고려한 수평방향의 평균 압밀도는 다음 식과 같다.

$$U_{hz} = 1 - \exp\left[-\frac{8T_h}{\mu}\right] \quad (2)$$

$$\mu = \left[\ln\left(\frac{d_e}{d_w}\right) - 0.75 \right] + \left[\left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right) \right] + \left[\pi z(2L - z) \frac{k_h}{q_w} \right] \quad (3)$$

$$T_h = \frac{c_h t}{d_e^2} \quad (4)$$

여기서, U_{hz} : 깊이 z 에서의 평균압밀도, C_h : 수평방향 압밀계수, d_e : 영향원의 직경, 1.13S (정사각형 배치), 1.05S (삼각형 배치), S : 드레인 간격, d_s : 스미어영역의 직경, d_w : 배수재의 환산직경, L : 배수재 길이, k_h : 수평방향 투수계수, k_s : 스미어존의 투수계수, q_w : 배수재의 통수능력이다.

2.2 Onoue의 해

Onoue(1988)가 제안한 스미어와 웰저항을 고려한 수평방향배수의 평균압밀도는 다음 식과 같다.

$$U_h = 1 - \exp\left[-8T_h / (F(n') + 0.8L)\right] \quad (5)$$

$$F(n') = \frac{(n')^2}{(n')^2 - 1} \ln(n') - \frac{3(n')^2 - 1}{4(n')^2} \quad (6)$$

여기서, $n' = nS^{n-1}$, $L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w}\right)^2$, $n(=d_e/d_w)$: 간격비,

$$T_h = \frac{c_h t}{d_e^2} : \text{수평방향 시간계수, } t : \text{압밀소요시간, } S(=d_s/d_w) :$$

스미어존의 직경비, $\eta(=k_h/k_s) : \text{스미어존의 투수계수비. } H : \text{점토층의 두께, } k_w : \text{연직배수재의 투수계수, } L : \text{배수저항계수이다.}$

3. 복합통수능시험과 시험조건 선정

3.1 복합통수능시험

본 연구에서 일반형 PBD, 대심도용 PBD, 실린더형 PBD, PCD($\Phi 32\text{mm}$), X형코어 PBD, 이중코어 PBD 배수재의 시간에 따른 압밀도를 평가하기 위하여 제작된 복합통수능 시험기의 장치구성은 그림 1과 같은 시스템으로써, 현장에서 연약지반에 연직배수재가 타설된 시스템을 도입하기 위해 배수재와 대상시료를 모델링할 수 있는 직경 50cm, 높이 120cm의 원통형 강제 프레임, 수두차에 의한 동수경사를 조절할 수 있는 유출수조와 유입수조, 프레임 상부에서 공기압으로 상재압을 가할 수 있는 컴프레서, 기타 부대장비로 구성되어 있다.

원통형 강제 프레임은 직경 50cm, 높이 120cm이고 실제 배수재설치는 하중재하 튜브가 30cm 높이이므로 높이 90cm이다. 배수재 내로 점토의 유입을 차단하고, 시험 중 배수재와 유출입 통로의 이탈을 방지하기 위해 프레임 상, 하부에 클램프(Clamp)를 설치하였다. 또한 프레임 상부에는 다이얼게이지(Dial Gauge)를 설치하여 침하량을 측정

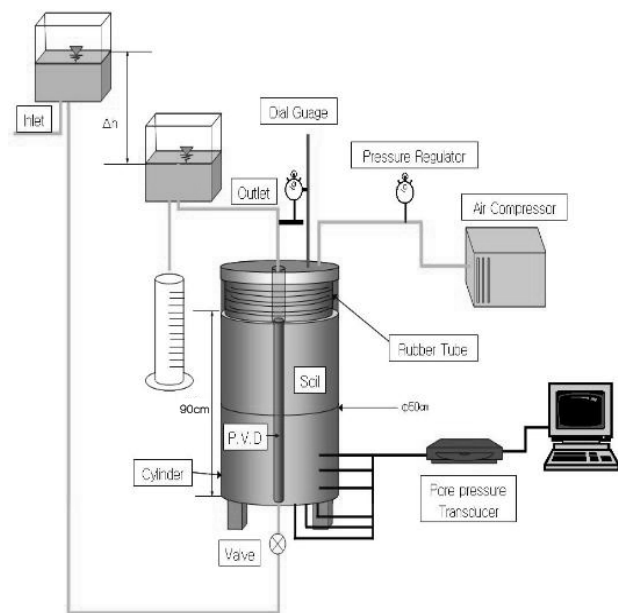


그림 1. 복합통수능 시험장치 개요도

할 수 있는 장치를 부착하였고, 클램프(Clamp)와 고정되어 다이아프램으로 가해지는 상재압을 전달해 주는 원형 가압판을 설치하였다. 수두차를 이용해 동수경사(i)를 조절하기 위한 장치는 유출수조와 유입수조가 있으며, 유출수조에서 배수관로를 통해 유입된 물이 시험기 하부를 통해 배수재 내부로 유입되게 하였고, 상부 배수관로를 통해 유입수조로 배출되게 하였다.

현장에서 타설되는 배수재는 스미어효과로 인해 지반 조건에 관계없이 압밀속도에 크게 영향을 미친다. 그러나 현재까지 스미어존의 영역에서 투수계수의 저하를 직접 측정하여 구하는 예는 거의 없으며, 시험기준도 명확하게 정해져 있지 않다. 본 실험에서도 현장에서 채취한 시료를 현장함수비와 밀도에 맞게 성형하여 시험하였고, 배수재 내로의 점토유입을 방지하기 위해 배수재를 설치한 후에 성형시료를 채워 넣는 방법을 도입하였기 때문에 교란효과에 대한 영향은 배제하였다. 본 실험은 점토지반에 타설된 배수재가 일정한 상재압 조건으로 압밀되는 과정에서 발휘할 수 있는 통수능력(Discharge Capacity, Q_w)을 평가하는데 있다.

본 연구에서 실시한 복합통수능 시험방법 및 절차는 그림 2와 같은 순서에 의해 진행하였다.

3.1.1 복합통수능시험에 사용된 배수재의 특성

연직배수재는 일반형 PBD, 대심도용 PBD, 실린더형 PBD, PCD($\Phi 32\text{mm}$), X형코어 PBD, 이중코어 PBD 배수재를 사용하였으며 사용된 배수재의 단면형태는 그림 3에서 볼 수 있다. 표 2에 사용된 배수재의 규격을 나타내었다.

3.2 시험조건 선정

배수재에 작용하는 측압의 계산은 Oostveen et al.(1990)이 제시한 다음의 식에 따라 구할 수 있다.

$$\sigma_h = \Delta p + \sigma'_h = H_{fill} \gamma_{fill} + K_o L (\gamma_{soil} - 1) \quad (7)$$

여기서, $H_{fill} : \text{성토고, } \gamma_{fill} : \text{성토재의 습윤단위중량, } L : \text{지반의 두께, } \gamma_{soil} : \text{지반의 포화단위중량이다.}$

식 (7) 을 이용하여 본 지구 대표단면을 기준으로 최대 연약지반 심도 내에서 받는 배수재가 받는 측압은 최대 약 $3.2 \sim 4.0 \text{kgf/cm}^2$ 정도로 산정될 수 있다. K_o 는 1이하의 값을 나타내므로, 위의 측압보다 낮은 측압이 산정될 것으로 예상되기는 하나, 본 연구에서는 5.0kgf/cm^2 를 최대측압

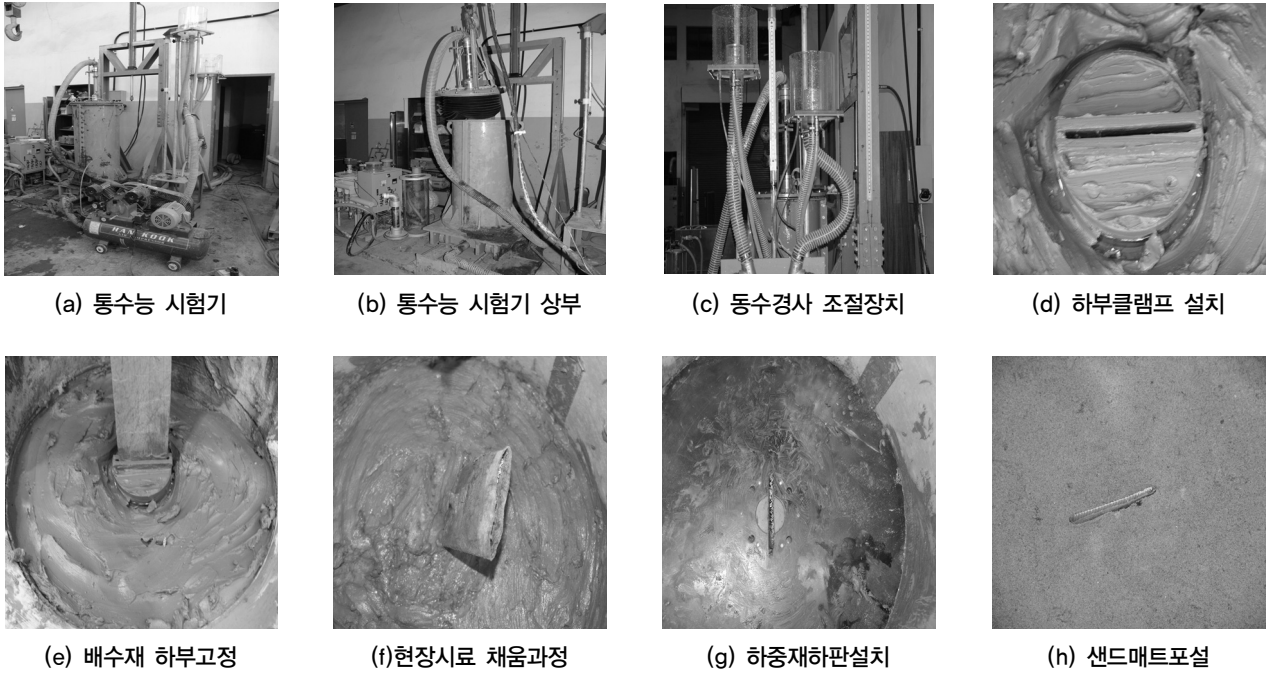


그림 2. 복합통수능 시험장치 절차

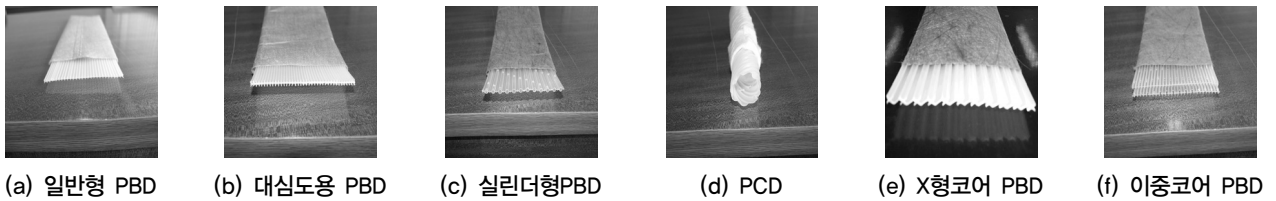


그림 3. 실험에 사용된 배수재 단면

표 1. 배수재별 통수능 시험조건

배수재종류	시험조건	배수재 길이	배수재 Core	상재압력(kg/cm ²)	동수경사(i)	배수조건
일반형 PBD		90cm	하모니카형	0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.2, 0.5, 1.0	일면배수
대심도용 PBD		90cm	하모니카형	0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.2, 0.5, 1.0	일면배수
실린더형 PBD(P,P)		90cm	원형+하모니카형	0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.2, 0.5, 1.0	일면배수
PCD		90cm	원형주름관	0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.2, 0.5, 1.0	일면배수
X형코어 PBD		90cm	X자형	0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.2, 0.5, 1.0	일면배수
이중코어 PBD		90cm	이중 하모니카형	0.5, 1.0, 3.0, 5.0	0.2, 0.5, 1.0	일면배수

표 2. 본 연구에서 사용된 배수재의 특성

배수재명칭	규격(mm)		재질		비고
	폭	두께	코어	필터	
일반형 PBD	99.3	3.70	PP	PP	
대심도용 PBD	97.1	4.66	PP	PP	
실린더형 PBD(P,P)	100	5.0	PE	PET	
PCD	Φ32		PE	PET	
X형코어 PBD	95	6.5	PE	PET	
이중코어 PBD	102.1	6.45	PP	PET	

표 3. 본 연구지역의 설계정수 적용값

구분	토질정수		단위	대상지반토
공학 적 특 성	입도	No. 200체 통과량	%	95%
	조도	액성한계 (LL)	%	34.6
		소성한계 (PL)	%	22.5
		소성지수 (PI)	%	12.1
	비중 (G _s)		-	2.66
	함수비 (W _n)		%	59.5
	흙의분류(USCS)			CL

으로 설정하였고, 하중의 크기를 0.5, 1.0, 3.0, 5.0kgf/cm²의 단계별 하중으로 연속적인 시험을 실시하였다. 또한, 표 3

은 본 연구대상지역 내에서 실시한 지반조사 자료를 나타낸 것이다.

4. 압밀도 산정결과

일반형 PBD를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5 kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 46.7~52.7cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 27.2~28.1cm³/s로 감소하였다. 대심도용 PBD를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 56~62.2cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 29.4~30.7cm³/s로 감소하였다. 실린더형 PBD(P.P) 를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 53.5~61.2cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 28.5~29.2cm³/s로 감소하였다. PCDΦ32mm를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 64.9~70.8cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 29.2~30.1cm³/s로 감소하였다. X형코어 PBD 시료를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 52.5~60.2cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 30.1~33.5cm³/s로 감소하였다. 이중코어 PBD 시료를

대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 63.5~76.9cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 28.3~30.3cm³/s로 감소하였다. 침하경향으로 분석된 압밀도와 통수능을 비교해 보면, 압밀이 진행됨에 따라 유사한 경향으로 통수능이 감소해 가는 것을 알 수 있다. 압밀도에 따른 통수능 감소 경향은 원지반토인 경우와 마찬가지로 압밀진행 과정과 유사하게 통수능도 감소해 가는 것으로 나타났다. 동수경사가 작아짐에 따라 통수능은 약간 증가하는 경향을 나타냈지만, 차이는 크지 않는 것으로 판단되었다. 그림 4~그림 9는 배수재 종류에 따른 시간경과에 따른 통수능과 압밀도를 비교한 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 일반형 PBD, 대심도용 PBD, 실린더형 PBD, PCD(Φ32mm), X형코어 PBD, 이중코어 PBD배수재에 대한 각각의 복합통수능시험을 통해 통수능과 시간에 따른 압밀도에 대한 평가를 수행한 결과는 다음과 같다.

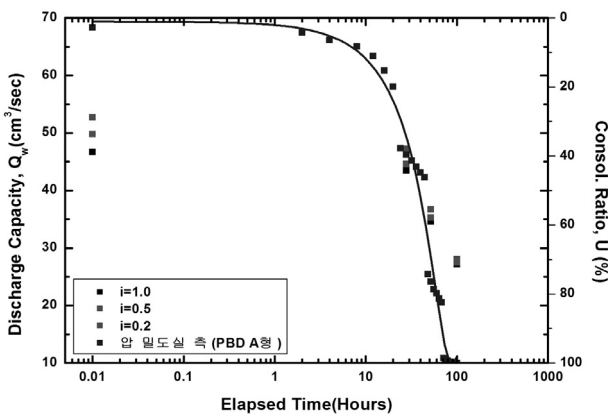


그림 4. 통수능과 압밀도 비교(일반형 PBD)

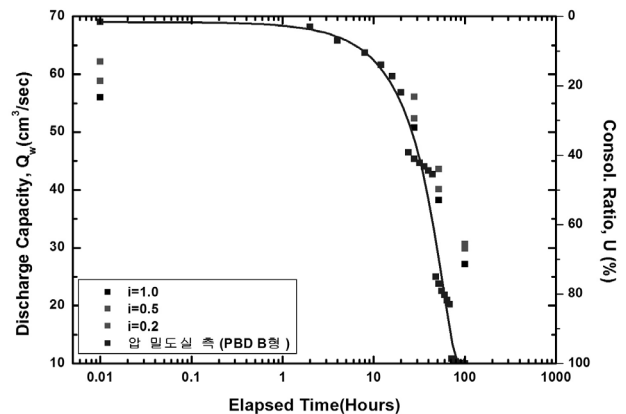


그림 5. 통수능과 압밀도 비교(대심도용 PBD)

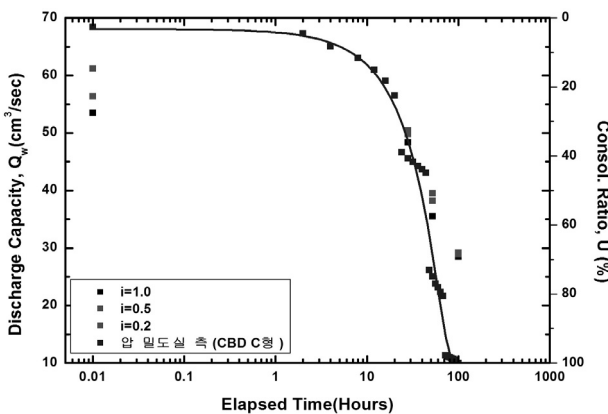


그림 6. 통수능과 압밀도 비교(실린더형 PBD)

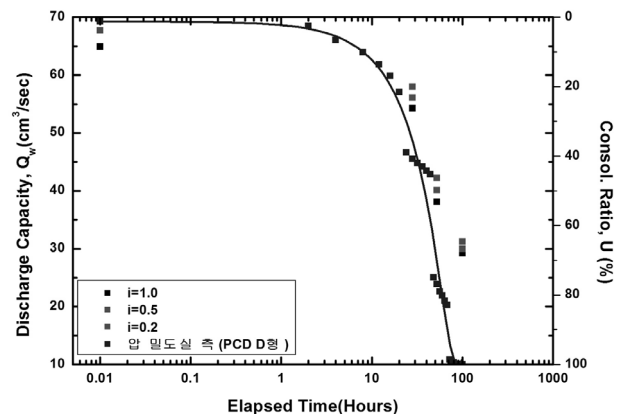


그림 7. 통수능과 압밀도 비교(PCD Φ32mm)

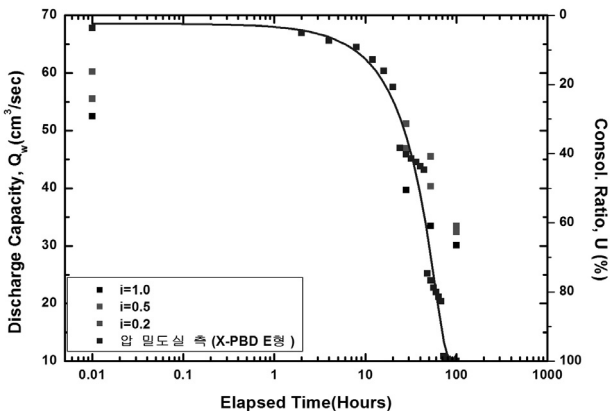


그림 8. 통수능과 압밀도 비교(X형코어 PBD)

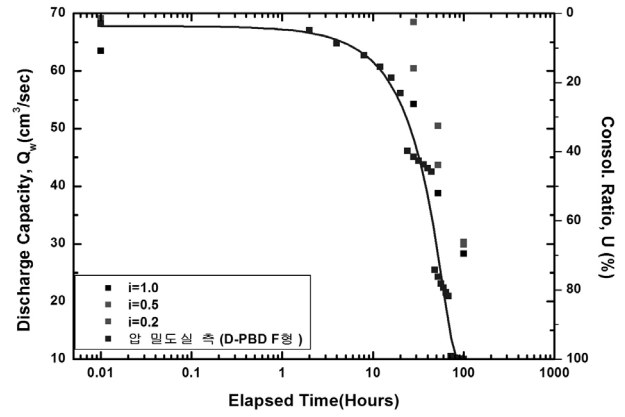


그림 9. 통수능과 압밀도 비교(이중코어 PBD)

1. 시간경과에 따른 통수능 변화에 대해 동수경사별로 통수능시험을 수행한 결과, 일반형 PBD 배수재시료를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 46.7~52.7cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 27.2~28.1cm³/s로 감소하였으며, 대심도용 PBD 배수재 시료를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 56~62.2cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 29.4~30.7cm³/s로 감소하였으며, 실린더형 PBD 시료를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 53.5~61.2cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 28.5~29.2cm³/s로 감소하였으며, PCD시료를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 64.9~70.8cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 29.2~30.1cm³/s로 감소하였고, X형코어 PBD 시료를 대상으로 시험한 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 52.5~60.2cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 30.16~33.5cm³/s로 감소하였으며, 이중코어 PBD 시료의 경우에는 상재압 0.5kg/cm² 구속조건에서 초기 통수능은 63.5~76.9cm³/s 정도로 나타났고, 상재압 5.0kg/cm²로 시험이 종료될 때까지 28.3~30.3cm³/s로 감소하였다.
2. 배수재별 시간에 따른 압밀도와 통수능 결과 침하경향으로 분석된 압밀도와 통수능을 비교해 보면, 압밀이

진행됨에 따라 유사한 경향으로 통수능이 감소해 가는 것을 알 수 있다. 압밀도에 따른 통수능 감소 경향은 원지반토인 경우와 마찬가지로 압밀진행 과정과 유사하게 통수능도 감소해 가는 것으로 나타났다. 동수경사가 작아짐에 따라 통수능은 약간 증가하는 경향을 나타냈지만, 차이는 크지 않는 것으로 판단되었다.

3. 본 연구에서는 해안매립지역에 대한 지반개량을 연직배수공법으로 적용하고자 인천해안지역의 시료를 대상으로 6가지 종류의 배수재를 대상으로 시공상황을 고려하여 복합통수능시험을 실시하였다. 분석결과와 더불어 대상지역의 토질 및 지하수 상태 등을 수시로 확인하며, 본 결과를 실제 현장에 적용하고자 할 때 설계사, 발주처, 시공사 각각의 입장을 고려하여 제시된 결과를 협의하여 적절하게 현장에 적용하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 농어촌연구원 (2006), *화전지구 산업단지 조성공사 연직배수재 통수능 평가 보고서*.
2. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", *Trans, ASCE*, 2346, pp.221-228.
3. Hansbo, S., (1979). "Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains", *Ground Eng.*, 12(5), 16-25.
4. Onoue, a. (1988), "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.
5. Oostveen, J.P., Troost, G.H., (1990), "Discharge index tests on vertical drains. In: Den Hoedt (Ed.)", *Proceedings of Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Vol.2, Balkema, Rotterdam, pp.345-350.

(논문접수일 2007. 10. 22, 심사완료일 2007. 11. 26)