

## 폐석회지반에서의 연직배수재의 종류에 따른 통수능 평가

### Evaluation of Discharge Capacity with PVDs Types in Waste Lime Area

신 은 철<sup>1\*</sup>      Shin, Eun-Chul  
김 기 한<sup>2</sup>      Kim, Gi-Han

#### ABSTRACT

Recently, the demand for industrial and residential lands are being increased with economic growth, however, it is difficult to acquire the land 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 settlement especially when their strength is low and depth is deep, it needs to accurately analyze the engineering properties of soft grounds and find general measurement for stabilization and economic design and management. Prefabricated vertical drain technology is widely used to accelerate the consolidation of soft clay deposits and dredged soil under the preloading and various types of vertical drain are being used with the discharge capacity. Under field conditions, the 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 experimental study were carried out for two different types of vertical drains by utilizing the large-scale model tests and waste lime.

#### 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 침도가 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 압밀축진을 위하여 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 폐석회 지반에 2가지 형태의 연직배수재를 적용하여 통수능력 분석하였다.

**Keywords :** PVDs, Core type, Discharge capacity, Waste lime

#### 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 PVDs(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 침도 또한 점차적으로 증가하여 약 50m 이상의 침도까지도 시공된 사례도 있다. 최근에는 기존의 석유화학 재료를 사용한 PVD와는 달리 천연섬유를 이용함으로써 배수재의 기능을 다한 후에 소정의 기간이 경과하면 지중의 박테리아에 의해 분해되어 최종적으로 흙과 동화하는 환경친화적인 특성을 가진 Fiber Drain의 활용성도 검토되고 있

1\* 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 (Member, Professor, Civil & Environmental System Eng., University of Incheon, E-mail: ecshin@incheon.ac.kr)

2 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정 (Member, Ph.D.Student, Civil & Environmental System Eng., University of Incheon)

다. 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 배수거리를 단축시켜 압밀을 촉진하는 공법이다. 그러나 연약지반에 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 기존 연약지반 개량공법에 적용되는 연직배수공법을 개량대상지반이 일반적인 연약점토와는 역학적 특성이 상이한 폐석회 지반에 적용하였으며, 일반형 PVD와 천연배수재 2가지 종류의 배수재에 대하여 복합통수능시험을 통해 통수능력 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,  $U$ 는 압밀도,  $T_h$ 는 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( $n = 30 \sim 40$ ). 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,  $U_{hz}$ 는 깊이  $z$ 에서의 평균압밀도,  $c_h$ 는 수평방향 압밀계수,  $d_e$ 는 영향원의 직경, 1.13S (정사각형 배치), 1.05S (삼각형 배치),  $S$ 는 드레인 간격,  $d_s$ 는 스미어영역의 직경,  $d_w$ 는 배수재의 환산직경,  $L$ 는 배수재 길이,  $k_h$ 는 수평방향 투수계수,  $k_s$ 는 스미어존의 투수계수,  $q_w$ 는 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,  $n' = nS^{\eta-1}$ ,  $L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w}\right)^2$ ,  $n(=d_e/d_w)$ 은 간격비,  $T_h = \frac{c_h t}{d_e^2}$ 은 수평방향 시간계수,  $t$ 는 압밀소요시간,  $S(=d_s/d_w)$ 는 스미어존의 직경비,  $\eta(=k_h/k_s)$ 는 스미어존의 투수계수비,  $H$ 는 점토층의 두께,  $k_w$ 는 연직배수재의 투수계수,  $L$ 는 배수저항계수이다.

### 3. 복합통수능시험과 시험조건 선정

#### 3.1 복합통수능시험

본 연구에서 일반형 PVD, 천연배수재의 상재하중에 따른 통수능력을 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 강재 프레임, 수두차를 이용한 동수경사를 조절할 수 있는 유출수조와 유입수조, 프레임 상부에서 공기압으로 상재압을 가할 수 있는 컴프레서, 기타 부대장비로 구성되어 있다.

원통형 강재 프레임은 직경 50cm, 높이 120cm이고 실

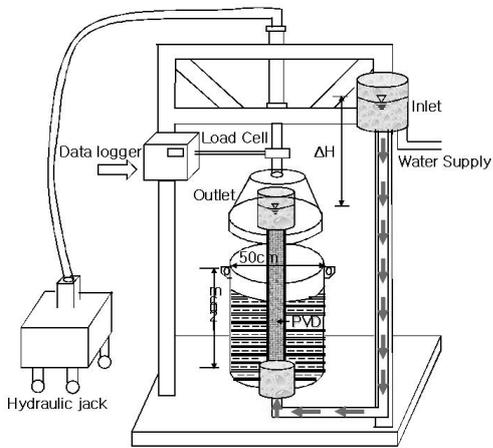


그림 1. 복합통수능 시험장치 개요도

제 배수재설치는 하중재하 튜브가 30cm 높이이므로 높이 90cm이다. 배수재 내로 점토의 유입을 차단하고, 시험 중 배수재와 유출·입 통로의 이탈을 방지하기 위해 프레임 상, 하부에 클램프(Clamp)를 설치하였다. 또한 프레임 상부에는 다이얼게이지(Dial Gauge)를 설치하여 침하량을 측정할 수 있는 장치를 부착하였고, 클램프(Clamp)와 고정되어 다이아프램으로 가해지는 상재압을 전달해 주는 원형 가압관을 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.

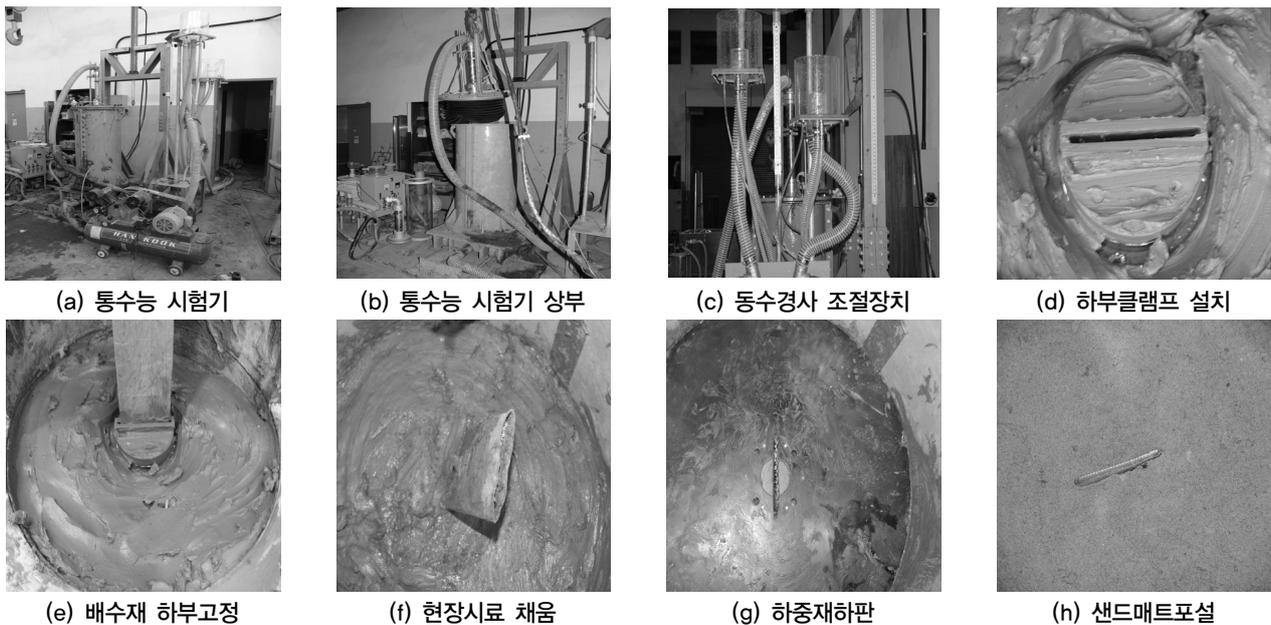


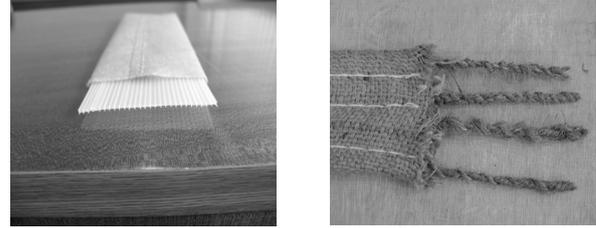
그림 2. 복합통수능 시험장치 절차

표 1. 배수재별 통수능 시험조건

배수재종류	시험조건	배수재 길이	배수재 Core	구속압(kg/cm <sup>2</sup> )	동수경사(i)	배수조건
일반형 PVD		90cm	하모니카형	0.5, 1.0, 1.5	0.5	일면배수
천연배수재		90cm	야자피	0.5, 1.0, 1.5	0.5	일면배수

3.1.1 복합통수능시험에 사용된 배수재의 특성

연직배수재는 일반형 PVD, 천연배수재를 사용하였으며 사용된 배수재의 단면형태는 그림 3에서 볼 수 있다. 표 2에 사용된 배수재의 규격을 나타내었다.



(a) 일반형 PVD (b) 천연배수재

그림 3. 실험에 사용된 배수재 단면

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,  $H_{fill}$ 는 성토고,  $\gamma_{fill}$ 는 성토재의 습윤단위중량, L는 지반의 두께,  $\gamma_{soil}$ 는 지반의 포화단위중량이다. 식 (7)을 이용하여 본 연구에서는 1.5kgf/cm<sup>2</sup>을 최대측압으로 설정하였고, 하중의 크기를 0.5, 1.0, 1.5kgf/cm<sup>2</sup>의 단계별 하중으로 연속적인 시험을 실시하였다. 또한, 표 3은 본 연구대상지역 내에서 실시한 지반조사 자료를 나타낸 것이다.

표 2. 본 연구에서 사용된 배수재의 특성

배수재명칭	규격(mm)		재질		비고
	폭	두께	코어	필터	
일반형 PVD	100	5.0	PP	PET	하모니카형
천연배수재	90	9.0	야자피	황마섬유	

표 3. 본 연구지역의 설계정수 적용값

구분	토질정수	단위	대상지반토	
공학 적 특 성	입도	No. 200체 통과량	%	96.4
	조도	액성한계 (LL)	%	74.4
		소성한계 (PL)	%	38.8
		소성지수 (PI)	%	35.6
		비중 ( $G_s$ )	-	2.57
		초기함수비 ( $W_n$ )	%	157.32
		흙의분류(USCS)		MH 또는 CH

4. 시험결과 분석

4.1 침하특성결과

그림 4는 일반형 PVD와 천연배수재의 시간에 따른 침하량 변화를 도시하였다. 동일한 재하응력과 재하기간 동안 일반형 PVD 타설시험의 침하량이 천연배수재 타설지반의 침하량에 비해 다소 크게 발생하였다. 각 응력단계 종점에서의 추정 함수비는 일반형 PVD에서 98.18%(0.5kg/cm<sup>2</sup>), 75.16%(1.0kg/cm<sup>2</sup>), 71.69%(1.5kg/cm<sup>2</sup> 재하 후 4시간 경과)이고, 천연배수재에서 107.9%(0.5kg/cm<sup>2</sup>), 83.06%(1.0kg/cm<sup>2</sup>), 75.55%(1.5kg/cm<sup>2</sup> 재하 후 4시간 경과)로서, 각 응력단계에 따른 함수비 변화 차이는 0.5kg/cm<sup>2</sup>에서 12.72%, 1.0kg/cm<sup>2</sup>에서 7.91%, 1.5kg/cm<sup>2</sup> 재하 후 4시간 경과시점에서 3.86%로서 재하응력의 크기가 증가할수록 두 종류의 배수재 타설지반의 함수비 차이는 점차 작아지는 것으로 확인되었다. 초기 타설 함수비에 있어서 일반형 PVD가 5.9%더 컸던 점을 감안하면 두 배수재간의 침하량 차이는 더욱 작을

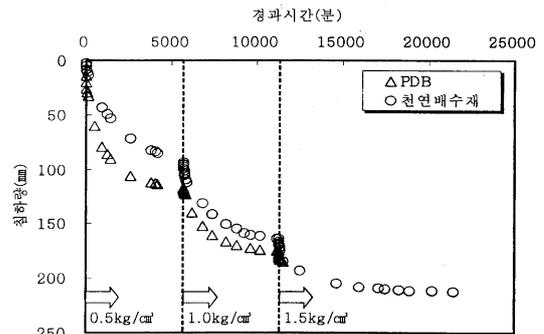


그림 4. 경과시간에 따른 침하량 변화

것으로 예측할 수 있다.

그림 5에는 위의 결과를 보다 가시적으로 관찰하기 위하여 각 시험 조건별 추정함수비 변화를 초기 함수비로 나누어 표시한 함수비 변화율( $w/w_0$ )을 시간에 따라 도시하였다. 1.0kg/cm<sup>2</sup>의 재하응력 종료시까지의 일반형 PVD 시험에서의 함수비 변화율이 다소 컸으나, 1.5kg/cm<sup>2</sup>재하

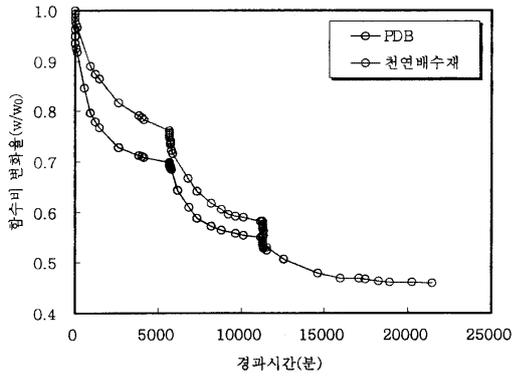


그림 5. 시간 경과에 따른 함수비 변화율( $w/w_0$ )

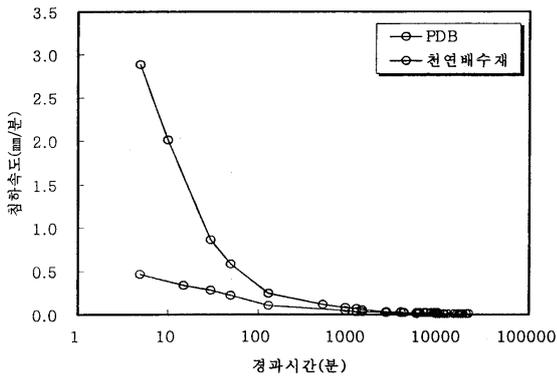


그림 6. 시간에 따른 침하속도 변화

이후 4시간 경과 시점에서의 함수비 변화율은 일반형 PVD가 0.52, 천연배수재에서 0.53으로 거의 근사한 수준을 나타내고 있다. 즉, 시험 초기조건이 상이한 점을 감안하면 두 배수재의 침하특성은 응력 단계가 증가할수록 서로 유사한 특성을 타나내는 것을 알 수 있다. 그림 6은 시간에 따른 침하속도를 제시한 것으로 시간이 경과함에 따라 침하속도는 서로 근사하게 나타나고 있어 응력 단계가 증가할수록 침하특성에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

#### 4.2 배수재의 통수능력 결과

표 4에는 시험조건별 배수재의 통수능 산정값을 제시하였다. 통수능은 시험 종료시 해체 직전 10분 간격으로 3회 측정하였으며 그 평균값을 제시하였다. 일반형 PVD의 경우에는  $14.34\text{cm}^3/\text{sec}$ 의 값을 나타내었고 천연배수재의 경우에는  $1.34\text{cm}^3/\text{sec}$ 의 값을 보여, 본 연구에서 적용한 폐석회 시료의 경우 일반형 PVD의 통수능이 천연배수재에 비하여 10배 이상 큰 것으로 나타났다. 표 5에는 기존연구자들에 의해 제안된 요구 통수능 값을 제시하였다. 일반형 PVD의 통수능은 Christopher & Holtz (1985)의 제안값을

표 4. 배수재별 통수능 산정값

조건			통수능값	
			$\text{cm}^3/\text{sec}$	$\text{m}^3/\text{yr}$
일반형PVD	측정시점	1.5kg/cm <sup>2</sup> 재하 후 4시간 경과	14.34	452.3
	최종침하량	185mm		
	최종함수비	73%		
천연배수재	측정시점	1.5kg/cm <sup>2</sup> 재하 후 172시간 경과	1.34	42.3
	최종침하량	212.18mm		
	최종함수비	69.88%		

표 5. 기존 연구자들의 요구통수능값(신은철 등, 2007)

연구자	통수능력, ( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )	연직응력, ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	동수경사
den Hoedt(1981)	3	0.3~0.5	0.33
Kremer(1983)	5.07	1.0	0.6
Jamiolkowski (1983)	0.315~0.473	3~5	-
Rixner(1986)	3.17		-
Hansbo(1986)	1.59~3.17		-
Christopher & Holtz(1985)	15.8		1.0
Holtz et al.(1987)	3.17~4.76	3~5	-
Lawrence & Koerner (1988)	1.56		-
Koda et al.(1989)	3.17	0.5	-
De Jager & Oostveen (1990)	10~50	1.5~3	-

제외하면 요구통수능을 만족하고 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 폐석회지반의 개량에 대해 연직배수공법 적용시 일반형 PVD, 천연배수재에 대한 적용성을 검토하기 위해 일련의 복합통수능시험을 실시하였다. 각각의 복합통수능시험을 통해 통수능에 대한 평가를 수행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 초기 침하양상은 일반형 PVD를 타설한 경우가 천연배수재의 경우에 비해 다소 크게 나타났으나 재하응력이 증가함에 따른 두 배수재간의 침하량은 점차 감소하였고, 또한 침하속도가 서로 유사한 것으로 분석되었다.
- (2) 복합통수능시험에 의해 측정된 통수능 값은 시험종료시 일반형 PVD에서  $14.34\text{cm}^3/\text{sec}$ ( $452.3\text{m}^3/\text{yr}$ ), 천연배수재에서  $1.34\text{cm}^3/\text{sec}$ ( $42.3\text{m}^3/\text{yr}$ )로서, 일반형 PVD의 통수능이 천연배수재에 비해 매우 큰 것으로 확인되었다. 그러나, 두 시험에서의 침하거동이 서로 근사하게 진행된 점과 천연배수재의 재하 기간이 일반형

PVD에 비하여 더욱 길었던 점을 감안하면 시험이 진행되는 동안 두 배수재의 최소 요구통수능은 모두 만족한 것으로 판단된다.

- (3) 본 연구에서는 폐석회지역에 대한 지반개량을 연직배수공법으로 적용하고자 폐석회지역의 시료를 대상으로 2가지 종류의 배수재를 대상으로 시공 상황을 고려하여 복합통수능시험을 실시하였다. 본 논문에서는 통수능 시험결과만을 분석하였으며, 향후 방사형 압밀이론을 이용한 압밀도 추정을 통한 분석이 수행되고 연직배수공법의 영향인자 내용을 검토하여 본 공법의 적용성을 분석하여야 한다.

## 참고문헌

1. 농어촌연구원 (2006), *화전지구 산업단지 조성공사 연직 배수재 통수능 평가 보고서*
2. 신은철, 오영인, 김성환, 차용인 (2007), “코어형태에 따른 연직배수재의 통수능 및 경제성 평가”, *한국지반공학회가을학술발표회 논문집*, pp.1306-1315.
3. Barron, R. A. (1948), “Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells”, *Trans, ASCE*, 2346, pp.221-228.
4. Christopher, B. R. and Holtz, R. D.(1985), *Geotextile Engineering Manual*, U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC.
5. Hansbo, S., (1979), “Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains”, *Ground Eng.*, 12(5), 16-25.
6. Onoue, a. (1988), “Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration”, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.
7. 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*, Balkema, Rotterdam, Vol.2, pp.345-350.

(논문접수일 2008. 2. 28, 심사완료일 2008. 3. 12)