

## 저소성 연약지반에서의 스미어 존 특성 평가

## Characteristics of the Smear Zone by Vertical Drain of Low Plasticity on Soft Ground

강 윤<sup>†</sup> · 백 성 철<sup>1)</sup> · 김 흥 택<sup>2)</sup>

Kang, Yun · Baek, Sungchul · Kim, Hongtaek

**ABSTRACT** : The vertical drain method recently being used in Korea is one of the popular soft ground improvement methods, and it is divided into the sand drain method, the pack drain method, the paper drain method, and the PBD method according to the drainage. However, these methods generate the disturbed zone called the smear zone when the drainage is penetrated into the in-situ ground. The characteristics of the smear zone generated cause the problems that the coefficient of permeability decreases, and then the consolidation time in the design becomes longer than expected. Even though the coefficient of horizontal consolidation and the coefficient of permeability in the smear zone are very important design factors directly influencing the degree of consolidation, in the existing studies, these coefficients have been empirically derived by the coefficient of vertical consolidation and used for the design. However, in case that these coefficients derived by the coefficient of vertical consolidation are applied to the actual design, a loss of the duration of construction and a loss of economical efficiency can be happened because of the inaccuracy of the coefficient of horizontal consolidation and the coefficient of permeability. Hence, in this study, in order to understand such influence, the laboratory test was carried out so as to reasonably determine the coefficient of permeability and the coefficient of consolidation in diverse ground conditions. Then, the range of smear effect on clay and silt was estimated with monitoring data through the laboratory test.

**Keywords** : Smear zone, Coefficient of horizontal consolidation, Coefficient of permeability, Vertical drain

**요 지** : 최근에 연약지반개량공사에서 연직배수공법은 가장 많이 사용하는 공법 중 하나이다. 그러나 개량을 위한 배수재의 시공 시에 지반 교란이 발생하여 스미어 존이라는 교란영역을 발생시킨다. 이렇게 발생된 스미어 존의 특징은 그 영역내의 투수계수가 감소하여, 설계시 예상하였던 압밀이 원활히 이루어지지 않는 문제점이 발생 된다는 점이다. 스미어 존의 수평압밀계수, 수평투수계수는 압밀도에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 설계인자이다. 그러나 기존에 수행되는 설계방법에서 이러한 주요설계인자의 산정 방법은 수직압밀계수에 의하여 수평압밀계수 및 수평투수계수를 경험적으로 유추하여 설계를 수행하고 있다. 그러나 이러한 방법으로 산정된 수평투수계수, 수평압밀계수는 설계 특성상 불확실성에 대한 과대설계로 진행되어 시공성, 공사기간 및 경제적인 측면에서 큰 손실을 가져올 수 있게 된다. 따라서 이번 연구에서는 국내에 서해안과 남해안 지역에 널리 분포하고 있는 저소성 지반을 대상으로 선정, 실험을 수행하여 저소성의 실트 및 점토지반에서의 스미어 존의 크기를 평가하였으며, 원지반의 압밀특성 및 물리적 특성과의 상관성 분석을 수행하여 설계시 참고자료로 활용할 수 있도록 하였다.

**주요어** : 스미어존, 수평압밀계수, 투수계수, 연직배수

## 1. 서 론

연직배수공법은 배수재를 사용하여 지반에 포함되어 있는 간극수를 강제 배수함으로써 지반 속의 간극비를 감소시켜 흙의 강도를 증가시키는 공법으로써, 기본 원리는 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 기초하여 압밀 소요시간이 최대 배수거리의 제곱에 비례한다는 점에 착안한 것이다. 즉, 연직배수공법은 투수계수가 낮은 연약지반내에 배수재를 수직으로 삽입, 최대 배수거리를 짧게 하여 지중의 간

극수를 수평방향으로 배수시키는 공법이다. 간극수는 배수재의 벽면으로 흡입되어 수평배수층인 필터 모래층으로 상향이동하고 상부의 모래층에서 자연 및 강제배수가 지속적으로 일어나도록 하여 조기압밀을 유도함으로써 압밀 침하를 촉진시키는 것이다. 이러한 연직배수공법은 배수재 설치시 불가항력적인 지반 교란이 발생하며, 이러한 교란영역을 스미어 존이라고 한다. 이렇게 발생된 스미어 존은 그 영역내의 투수계수 및 압밀계수가 감소하여, 설계시 예상하였던 압밀이 원활히 이루어지지 않는 문제점이 발생

† 정희원, (주)동성엔지니어링 과장, 공학박사(E-mail : antps43@hanmail.net)

1) 비희원, (주)동일건설 토목본부장

2) 정희원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사

된다는 점이다.

스미어 존의 수평압밀계수, 수평투수계수 및 스미어 존의 크기는 압밀도에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 설계인자이다. 그러나 기존에 수행되는 설계방법에서 이러한 주요설계인자의 산정방법은 수직압밀계수에 의하여 수평압밀계수 및 수평투수계수를 경험적으로 유추하여 설계에 적용하고 있는 실정이며, 스미어 존의 크기의 경우에는 지반조건을 고려하지 않고 2.0~3.0D(D : 맨드렐의 환산직경)인 안전측의 값을 일률적으로 적용하여 설계를 수행하고 있다. 그러나 이러한 방법으로 산정된 수평투수계수, 수평압밀계수 및 스미어 존의 크기는 설계 특성상 불확실성에 대한 과대설계로 진행되어 시공성, 공사기간 및 경제적인 측면에서 큰 손실을 가져올 수 있게 된다. 따라서 이번 연구에서는 국내에 서해안과 남해안 지역에 널리 분포하고 있는 저소성 지반을 대상으로 선정, 실험을 수행하여 저소성의 실트 및 점토지반에서의 스미어 존의 크기를 평가하였으며, 원지반의 압밀특성 및 물리적 특성과의 상관성 분석을 수행하였다.

## 2. 환산 스미어 존 평가방법

### 2.1 해석 개요

원지반을 구성하는 토질에 따라서 스미어 존의 발생에 미치는 영향이 달라질 수 있으며, 스미어 존 내부의 투수계수 변화에 따라서 압밀지연 정도가 차이가 날 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 김현태(1998)는 이러한 점을 고려하여 투수계수 변화식을 유도한 바 있으며, 또 이를 적용하여 압밀도를 계산하는 수치해석 프로그램을 개발하였다. 또한 최근에 원지반의 구성토질에 대한 특성을 고려한 연구로는 대표적으로 신은철 등(2005)이 자연상태의 연약지반이 아닌 주로 산업활동 부산물인 폐석회로 구성된 지반의 개량시 연직배수재를 사용한 경우에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 연직배수재를 사용하여 연약지반 개량하는 설계에서 Barron(1948), Yoshikuni 등(1974), Hansbo(1979), Onoue (1988(a),(b))등이 제시한 방법들을 사용하고 있으며, 일부 방법의 경우 배수저항이나 스미어 존은 적용이 가능하지만 배수재 타설시 연속적으로 발생하는 특성의 변화들은 반영하지 못하고 있다. 또한 모형 및 현장실험을 수행하여도 명확한 스미어 존의 크기를 결정하는 방법의 부재 및 경험부족등을 이유로 하여, 실제 설계시에 적극 반영하지 못하고 있으며, 심지어 압밀도 계산시 가장 중요한 요소인 스미어 존의 크기 및 투수계수비 등은 대부분의 경우에 있어서 기존의 제안값들을 사용하고 있다.

강윤(2006)은 수치해석을 통하여 스미어 존 내부에서 반경방향의 투수계수의 분포 경향이 압밀도에 미치는 영향을 주요변수를 변화시켜가며 변수분석을 수행하여, 주로 사용되고 있는 압밀도 산정방법에 적용이 가능한 스미어 존의 환산크기를 산정하는 방법을 제안하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 다음의 식에 의하여  $k_{20}$ 을 구한다.

$$k_{20} = k_s + 0.2(k_h - k_s)$$

여기서,  $k_{20}$  : 스미어 존의 투수계수와 원지반의 투수계수의 차이의 20%에 해당하는 값을 스미어 존의 투수계수에 더하여 준 값으로 스미어 존의 환산크기를 구하기 위한 변수  
 $k_s$  : 측정된 스미어 존의 투수계수  
 $k_h$  : 원지반의 수평투수계수

- (2) 모형실험의 결과로 구한 배수재로 부터의 이격거리별 수평투수계수 그래프에 위에 식으로 구한  $k_{20}$  값을 직선으로 도시한다.
- (3) 이격거리별 수평투수계수와 도시한  $k_{20}$  직선과 만나는 점에서의 스미어 존의 크기가 환산크기이다.

본 연구에서는 위의 방법을 토대로 하여 각각의 모형토조실험에 의하여 나타난 수평압밀계수 분포결과에 대하여 스미어 존의 크기를 결정하여 분석에 사용하였다.

## 3. 모형토조실험

### 3.1 개요

이번 연구에서는 연약지반의 개량공사에서 맨드렐 관입시 발생하는 지반교란효과를 파악하여 스미어 존을 알아보고자 모형토조실험을 수행하였다. 모형토조실험에서는 연구대상지반의 현장지반상태를 최대한 모사하기 위하여 현장에서 채취한 교란시료를 가지고 완전 교란시켜 토조에 넣고 하중을 가하여 압밀을 시킨 후에 실험을 수행하였다. 표 1은 이번 연구에서 수행한 Case를 나타내었다.

### 3.2 모형실험

실제 국내현장에서 시공되고 있는 배수재 타입방식을 모형화 하여 스미어 존 모형 실험장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 그림 1처럼 모형토조 내에 간극수압계를 사용

표 1. 모형토조실험 종류

토 질	Case No.	실험회수	맨드렐 형상	비 고
저소성 실트	1	1 회	직사각형(30mm×10mm)	- 스미어 효과에 영향을 줄 수 있는 다른 변수들은 고정
	2	1 회	원형( $\phi$ 25mm)	
	3	1 회	원형( $\phi$ 40mm)	
저소성 점토	4	1 회	직사각형(30mm×10mm)	- 토조크기 : $\phi$ = 300mm H = 500mm
	5	1 회	원형( $\phi$ 25mm)	
	6	1 회	원형( $\phi$ 40mm)	

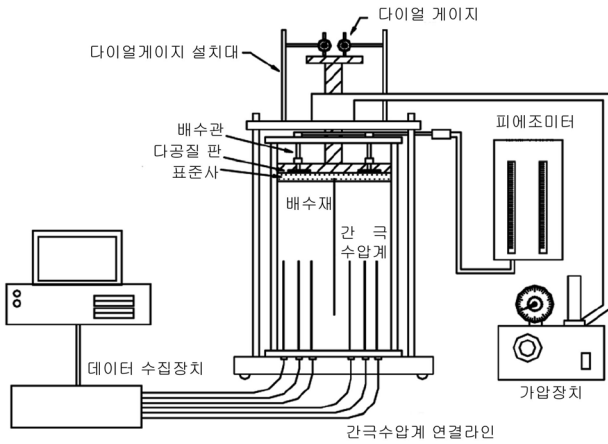


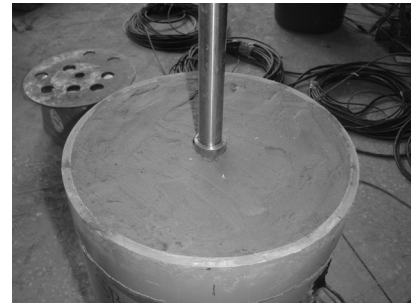
그림 1. 스미어 존 측정을 위한 모형토조실험 개요

하여 실험시에 간극수압 계측을 통하여 스미어 존의 범위 및 특성을 측정하는 방법이다. 실험순서는 다음과 같으며, 이번 연구에서 수행된 모형토조실험과정을 그림 2에 나타내었다.

- (1) 토조 속에 교란시료를 채운 후 정해진 위치에 간극수압계를 설치한다.
- (2) 유압잭으로 실험을 수행 할 현장의 해당심도에서의 상재하중을 재하하여 현장여건과 동일한 조건이 되도록 재성형한다.
- (3) 간극수압계를 데이터 수집장치에 연결시킨 후 맨드렐을 정적 관입시키면서 계측을 실시한다.
- (4) 실험 후 간극수압 소산결과를 토대로 스미어 존의 크기 및 수평방향 압밀계수, 투수계수 등을 계산한다.

이때 투수계수는 배수방향이 수평방향이므로 물의 흐름이 수평방향으로 흐르므로 수평방향의 투수계수이다.

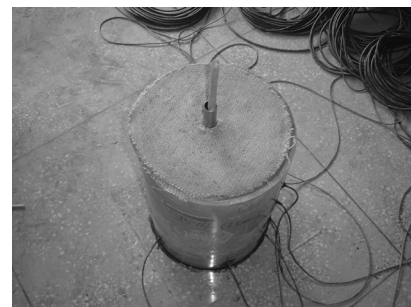
모형토조실험에 이용된 모형지반은 경기도 화성시에 위치하고 있는 간척지인 OO지구에서 채취하였다. 모형토조 실험에 앞서 모형지반의 신뢰성 높은 물리, 역학적 특성을 알아보기 위하여 다양한 토질시험을 수행하였다. 토질시험은 모형토조실험 후 토조내에서 교란 및 불교란시료를 채취하여 시험하였으며, 물리시험 및 압밀시험을 각 Case별



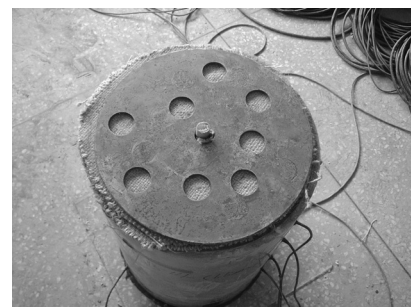
(a) 지반조성



(b) 모형지반 압밀



(c) 배수재 타설 및 맨드렐 인발



(d) 배수재 설치 완료 후 간극수압 측정

그림 2. 모형토조실험 과정

표 2. 모형지반의 물리성시험결과

구분	함수비 (%)	비중	#200통과량 (%)	아터버그			압밀 시험				USCS
				LL	PL	PI	Cc	Pc (kgf/cm <sup>2</sup> )	C <sub>v</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	C <sub>h</sub> (cm <sup>2</sup> /s)	
CASE 1	35.9	2.671	97.2	N.P	N.P	N.P	0.16	0.92	1.31E-3	2.61E-3	ML
CASE 2	33.2	2.65	98.1	N.P	N.P	N.P	0.17	0.97	1.91E-3	3.83E-3	ML
CASE 3	34.2	2.676	97.6	N.P	N.P	N.P	0.11	0.90	3.32E-3	6.64E-3	ML
CASE 1	44.2	2.57	99.4	46.0	20.2	25.8	0.29	1.40	6.07E-4	1.21E-3	CL
CASE 2	46.2	2.649	98.1	47.2	20.3	26.9	0.31	0.85	4.53E-4	9.06E-4	CL
CASE 3	55.7	2.601	99.4	42.6	24.6	18.0	0.22	1.10	7.91E-4	1.58E-3	CL

표 3. 모형배수재의 제원

구분	형상	종류	크기		
			H	B	L
배수재	직사각형	P.B.D	500mm	30mm	10mm
	원형		φ 10mm		
매트	Fiber mat		φ 30mm, t=3mm		

표 4. 모형맨드렐의 제원

구분	형상	크기		
		H	B	L
맨드렐	직사각형	500mm	30mm	10mm
	원형	φ 25mm		
		φ 40mm		

로 수행하였다. 그 결과는 표 2에 나타내었으며, 모형토조 실험에 사용된 배수재 및 맨드렐의 제원은 표 3 및 표 4에 나타내었다.

### 3.3 실험방법

모형토조실험에 사용된 모형지반은 시료를 채취하여 완전히 교란시켜 토조안에 채워 넣은 후에 간극수압계를 모형지반 내부 소정의 위치에 설치하고 압밀을 진행하였다. 이러한 과정은 모형실험 Case별로 수행하였으며, 95% 이상 간극수압의 소산이 이루어진 이후에 모형맨드렐을 관입하면서 모형지반내에서 발생하는 간극수압의 변화를 측정하는 방식으로 진행하였다. 맨드렐의 관입은 분당 2cm 정도의 속도로 관입하는 변위제어방식으로 진행되었다. 아울러 맨드렐의 형상이 바뀌더라도 실험방법은 동일하게 진행하였다. 실험결과 분석시에는 발생한 과잉 간극수압의 값을 모두 해당실험시 발생하는 최대값으로 나누어서 정규화한 결과를 사용하기로 하였다. 또한 본 연구에서 수평압밀계수의 결정은 Teh 등(1991)이 제안한 간극수압소산결과를 사용하여 수평압밀계수를 결정하는 방법을 사용하여 수평압밀계수를 산정, 적용하였다.

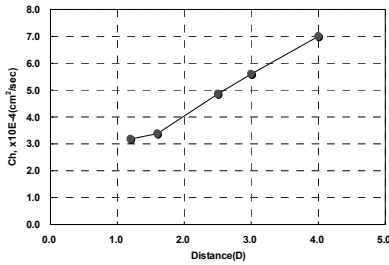
## 4. 결과분석 및 고찰

### 4.1 저소성 실트(ML)

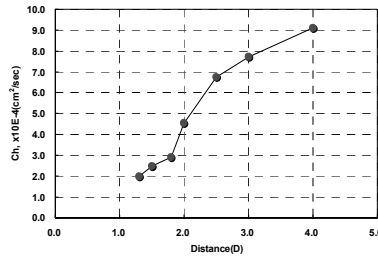
#### 4.1.1 수평압밀계수의 변화

맨드렐이 모형지반 내부로 타입되는 경우에 발생하는 과잉간극수압의 변화를 살펴보았으며, 과잉간극수압의 시간변화에 따른 변화양상을 분석하였다. 아울러 신뢰성 높은 스미어 존의 결정을 위하여 맨드렐 타입 후 발생되었던 과잉간극수압이 소산되는 시점을 기준으로 하여 시간에 따른 과잉간극수압의 소산실험결과를 분석하여, 수평압밀계수를 산정함으로써 스미어 존을 평가하여 보았으며, 그 결과는 그림 3에 나타내었다.

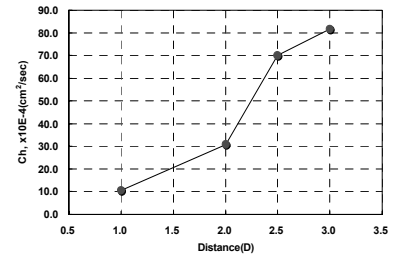
그림 3의 내용을 살펴보면, 맨드렐이 관입되는 거리에서 이격된 위치별로 수평압밀계수값은 각기 다르게 평가되었다. 공통적으로는 직경비가 1.5~2.0D인 지점까지는 수평압밀계수가 비교적 작은 것으로 평가되었으나, 직경비 2.0D 부근부터 급격하게 증가하는 경향을 나타냈다. 수평압밀계수가 증가하는 경향이 지수곡선의 형태로 증가하는 경향을 보이므로 앞서 제안한 방법으로 스미어 존의 크기를 구하였으며 그 값을 표 5에 나타내었다. 이번 분석에서 사용된 원지반의 수평압밀계수는 스미어 특성 시험결과



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

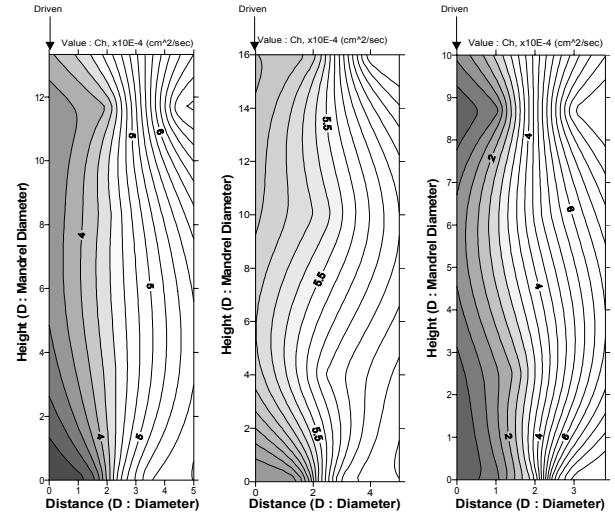
그림 3. 직경비에 따른 수평압밀계수 변화

표 5. 제안한 방법에 의한 스미어 존의 크기

구분	CASE 1	CASE 2	CASE 3
스미어 존의 크기	1.9D	1.8D	1.6D

나타난 수평압밀계수 분포 경향으로 짐작해보면 스미어 존의 크기가 실제 맨드렐의 위치로부터 최외곽에 위치한 간극수압계의 위치와 비슷할 것으로 예상되므로 최외곽에 위치에서의 수평압밀계수를 원지반의 수평압밀계수와 동일하다고 보고, 최외곽에서 구한 수평압밀계수 값을 각각 적용하였다.

표 5를 보면 모형토조실험 결과 1.6~1.9D 사이의 값을 보이고 있으며 따라서 이번 연구의 대상 토질인 저소성 실트 층에 대하여 설계에 적용하는 데 적합한 스미어 존의 크기는 2.0D 이하의 값을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

그림 4. 모형토조 반단면에서의 수평압밀계수 분포

#### 4.1.2 토조 내 수평압밀계수 분포

이번 연구에서는 모형실험결과를 이용하여 모형토조 내부의 스미어 존의 분포양상을 알아보기 위하여 크리깅 기법을 이용하여 모형토조 내부의 수평압밀계수 분포양상을 추정함으로써 스미어 존을 평가하였다. 그림 4에서는 모형토조 반단면에서의 수평압밀계수 분포를 나타냈는데, 맨드렐이 관입되는 지점으로부터 1.5D 이격된 거리까지는 수평압밀계수가 비교적 작은 것으로 평가되었다. 그러나 1.5D~2.0D 사이에서는 서서히 변화하다가, 맨드렐의 직경비가 2.0D 이상인 지점부터는 수평압밀계수가 상대적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 보이는 것은 맨드렐의 직경비가 1.5D~2.0D 지점까지는 맨드렐의 관입으로 인하여 모형지반의 수평투수계수가 감소하는 스미어 효과가 뚜렷하게 나타났기 때문으로 생각된다.

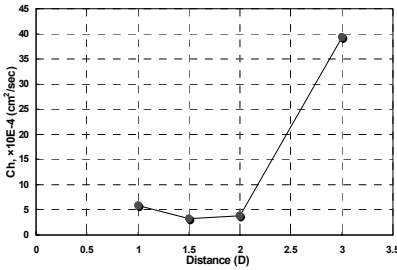
### 4.2 저소성 점토(CL)

#### 4.2.1 수평압밀계수의 변화

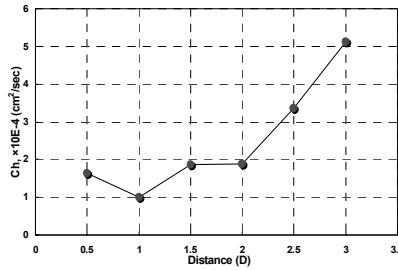
맨드렐이 모형지반 내부로 타입되는 경우에 발생하는 과잉간극수압의 변화를 살펴보았으며, 과잉간극수압의 시

간변화에 따른 변화양상을 분석하였다. 아울러 신뢰성 높은 스미어 존의 결정을 위하여 맨드렐 타입 후 발생되었던 과잉간극수압이 소산되는 시점을 기준으로 시간에 따른 과잉간극수압의 소산실험결과를 분석하여, 수평압밀계수를 산정함으로써 스미어 존을 평가하여 보았으며, 그 결과는 그림 5에 나타내었다.

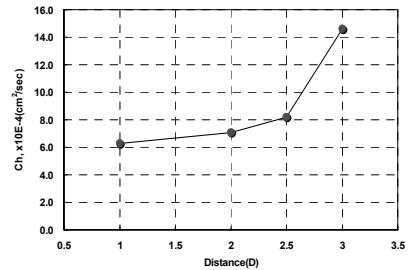
그림 5의 내용을 살펴보면, 맨드렐이 관입되는 거리에서 이격된 위치별로 수평압밀계수값은 각기 다르게 평가되었으며 발생하는 수평압밀계수의 분포경향도 미소한 차이를 보이고 있다. 공통적으로는 이격거리가 2.0D인 지점까지는 수평압밀계수가 비교적 작은 것으로 평가되었으나, 이후 이격거리가 증가함에 따라서 급격하게 증가하는 경향을 나타냈다. 수평압밀계수가 증가하는 경향이 지수곡선의 형태로 증가하는 경향을 보이므로 앞서 제안한 방법으로 스미어 존의 크기를 구하였으며 그 값을 표 6에 나타내었다. 이번 분석에서 사용된 원지반의 수평압밀계수는 스미어 특성 시험결과에서 나타난 수평압밀계수 분포 경향이 스미어 존의 크기가 실제 최외곽에 위치한 간극수압계의 위치보다 더 클 것으로 예상되므로 최외곽에 위치에서



(a) Case 4



(b) Case 5



(c) Case 6

그림 5. 직경비에 따른 수평압밀계수 변화

표 6. 제안한 방법에 의한 스미어 존의 크기

구분	CASE 4	CASE 2	CASE 3
스미어 존의 크기	2.2D	2.5D	2.4D

의 수평압밀계수를 원지반의 수평압밀계수와 동일하다고 보기 힘들 것으로 판단되어, 원지반의 압밀시험 결과에서 유추된 수평압밀계수 값을 적용하였다.

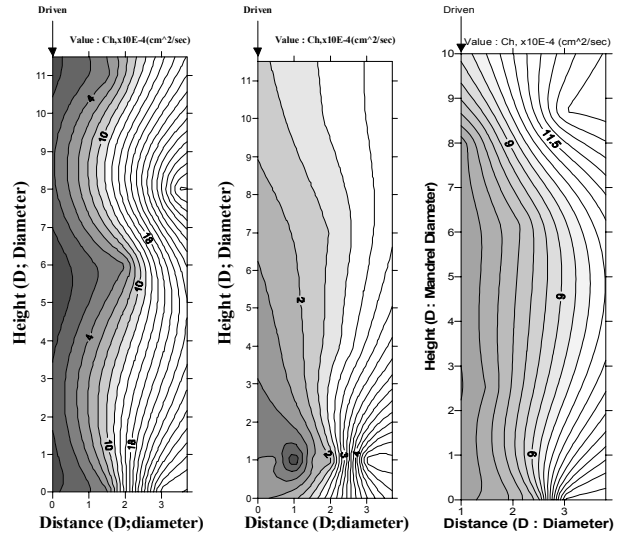
표 6을 보면 모형토조실험 결과 2.2~2.5D 사이의 값을 보이고 있으며 따라서 이번 연구의 대상 토질인 저소성 점토층에 대하여 설계에 적용하는 데 적합한 스미어 존의 크기는 2.0D 이상의 값을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 토조내 수평압밀계수 분포

이번 연구에서는 모형실험결과를 이용하여 모형토조 내부의 스미어 존의 분포양상을 알아보기 위하여 크리깅 기법을 이용하여 모형토조 내부의 수평압밀계수 분포양상을 추정함으로써 스미어 존을 평가하였다. 그림 6에서는 모형토조 반단면에서의 수평압밀계수 분포를 나타냈는데, 맨드렐이 관입되는 지점으로부터 2.0D 이격된 거리까지는 수평압밀계수가 비교적 작은 것으로 평가되었다. 그러나 직경비가 2.0D~2.5D 이상인 지점부터는 수평압밀계수가 상대적으로 크게 나타났다. 이와 같은 결과를 보이는 것은 직경비가 2.0D~2.5D 지점까지는 맨드렐의 관입으로 인하여 모형지반의 수평투수계수가 감소하는 스미어 효과가 뚜렷하게 나타났기 때문으로 생각된다. 따라서 본 모형토조실험에서 나타난 스미어 존의 크기는 Hansbo(1987)가 제안한 결과와 유사한 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

#### 4.3 수평압밀계수

이번 분석에서는 모형토조실험을 통한 소산특성을 분석하여 구한 수평압밀계수와 일반적으로 설계에서 많이 적용하는  $C_h = C_v$  값을 적용하여 구한 수평압밀계수와의 비교, 분석을 통하여 그 차이를 알아보려 하였다. 그림 7에서는 소산결과 및  $c_v$  값으로 구한 수평압밀계수 및 원지반의



(a) Case 4 (b) Case 5 (c) Case 6

그림 6. 모형토조 반단면에서의 수평압밀계수 분포

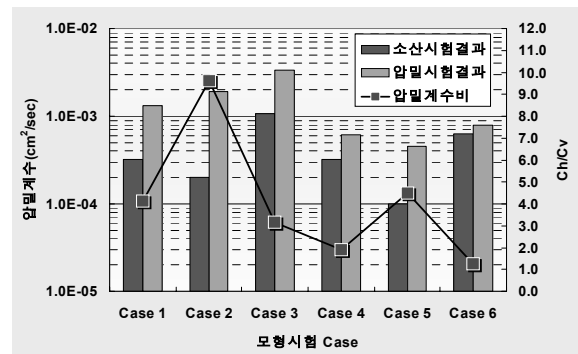


그림 7. 수평압밀계수 및 압밀계수비

압밀계수에 대한 스미어 존의 수평압밀계수의 비( $C_h/C_v$ )를 모형실험 Case별로 비교하여 나타내었다.

그림 7을 보면 전체적으로 모형토조실험의 간극수압소산에 의하여 산정된 수평압밀계수가 다소 작은 결과 값을 나타낸다. 그 비율, 즉 압밀계수비는 1.3~9.6의 분포로 나타나 일정한 값으로 제안하기가 매우 어려운 것으로 나타났다. 다만 분포경향을 살펴보면 저소성 실트질 지반의 압밀계수비가 3.1~9.6, 저소성 점토질 지반의 압밀계수비가

1.3~4.5로 나타나, 실트질 지반의 점토질 지반보다 압밀 계수비가 2배 이상의 큰 값을 나타낸다.

수평압밀계수가 작은 값이 사용되면 전체적으로 압밀속도가 늦어지므로 압밀지연이 나타나게 된다. 따라서 기존에 많이 사용되는 설계방법과 같이 원지반의 수직압밀계수를 스미어 존의 수평압밀계수와 같이 하는 제안값을 설계에 적용하는 것은 시공시 압밀지연효과를 고려하지 못하므로 비효율적인 설계를 유발한다.

## 5. 결론 및 제언

국내에 서해안 지역에 널리 분포하고 있는 저소성의 실트 및 점토지반을 대상으로 선정, 모형토조실험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 모형토조실험의 결과를 비교 분석한 결과, 저소성 실트지반에서의 스미어 존의 크기는 2.0D이하의 값을 사용하는 것이 합리적인 것으로 판단되며, 저소성 점토지반에서의 스미어 존의 크기는 2.0D이상의 값을 사용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.
- (2) 실내 압밀시험결과를 토대로 산정한 수직압밀계수와 모형실험 결과를 토대로 산정한 수평압밀계수와와의 관계( $C_h/C_v$ )를 분석한 결과, 저소성 실트에서는 3.1~9.6의 비를 나타내며, 저소성 점토에서는 1.3~4.5의 비를 나타냈다.
- (3) 본 모형토조실험에서 나타난 스미어 존의 크기는 Hansbo (1987)가 제안한 결과와 유사한 결과를 나타내는 것으로 나타났으며 따라서 다층지반의 압밀해석시 스미어 존의 크기를 같게 보아서는 과대 혹은 과소 설계가 예상

되므로 실트와 점토를 구분하여 압밀해석을 하여야 할 것이다. 이에 대하여 추가적으로 다층지반의 압밀해석 기법에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

## 참고 문헌

1. 강윤(2006), *연직배수재의 교란영역특성을 고려한 압밀지연 특성 분석*, 박사학위논문, 홍익대학교, pp. 102~107.
2. 김현태(1998), *스미어존내 투수성변화와 웰저항을 고려한 연직배수공법의 압밀해석*, 박사학위 논문, 동국대학교, pp. 27~50.
3. 신은철, 박정준, 김종인(2005), 연직배수재를 이용한 폐석회 슬러지의 지반개량 효과, *지반환경공학회 논문집* 제6권 제2호 pp. 51~60.
4. Barron, R. A.(1948), Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, *Trans, ASCE*, Vol. 113, No. 10, p. 2346, pp. 221~228.
5. Hansbo, S.(1979), Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 21~25.
6. Hansbo, S.(1987), Fact and Fiction in the Field of Vertical Drainage, *Prediction and performance in Geotechnical Engineering*, Calgary, pp. 61~72.
7. Onoue, A.(1988(a)), Consolidation of multilayered anisotropic soils by vertical drains with well resistance, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 3. pp. 75~90.
8. Onoue, A.(1988(b)), Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration, *Soils and Foundations*, Vol. 28, No. 4, pp. 165~174.
9. Teh, C. I., and Houslyby, G. T.(1991), An analytical study of the cone penetration test in clay, *Geotechnique*, Vol. 41, No. 1. pp. 17~34.
10. 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.

(접수일: 2007. 3. 15 심사일: 2007. 3. 16 심사완료일: 2007. 4. 27)