

PVD 설계 시 고려할 불확실성 요소에 관한 연구

Investigation of Uncertain Factors Affecting on Designing Prefabricated Vertical Drain

이 송*, 최 우진**, 김 창수***,
Lee, Song, Choi, Woo-Jin, Kim, Chang-Soo

ABSTRACT

The Prefabricated Vertical Drain(PVD) method is most widely used technique to accelerate the consolidation process and to strengthen the weak clayey soil in situ. Uncertainty in the consolidation process via the Prefabricated Vertical Drain(PVD), and the effects of uncertainty on the design of PVDs, are investigated in this paper. Among the effect factors, the coefficient of horizontal(radial) consolidation, C_h , is the most important and sensitivity analysis of the degree of consolidation with respect to the other effect factors are carried out. For the reliable determination of uncertain quantities, the laboratory and in-situ tests are carried out. Henceforth, probability analysis that take the uncertainty into account are executed and reliable design method is provided in practice.

1. 서 론

연직배수공법은 연직으로만 발생하는 무처리지반의 배수방향에 더하여 방사형 배수를 복합적으로 작용시켜 연약토층의 압밀시간을 단축시키는 것을 목적으로 하고 있다. 선행하중재하공법(Preloading)은 연약지반의 압밀속도를 촉진시키고 강도를 증진시키는데 널리 사용되지만, 점토지반의 경우 투수계수 값이 상당히 작으므로 목표 압밀도에 도달하는데 상당한 시간이 소요된다. 따라서 연약토층에 연직드레인을 타설하여 방사형 배수를 유도함으로써 압밀시간을 단축시키고, 그 결과 지반의 지지력과 전단강도를 조기에 증가시킬 수 있다. 연직드레인을 통한 목표압밀도에 도달하는 시간은 지반조건과 드레인의 특성에 의하여 좌우되며 지반과 드레인의 특성은 불확실성을 나타낸다. 이는 지반퇴적의 근본적인 가변성과 측정의 오차에 기인한다. PVD 공법의 설계 시 영향을 주는 요소로는 통수능, 스미어존, 스미어존과 교란되지 않은 지반의 수평투수계수의 비, 수평압밀계수 등이 있다. 보다 현장 계측값에 접근하도록 PVD를 설계하기 위해서는 연직드레인의 거동에 영향을 주는 주요 인자에 대해 연구하여 현장 실측치와 비교할 필요가 있다. 본 연구에서는 실내시험을 통해 이러한 영향요소들의 특성과 PVD 설계에 미치는 영향의 대소를 평가할 수 있는 예민도 분석을 수행하였고, 현장시험 결과를 실내시험과 비교하였다. 결론으로 이렇게 평가된 영향요소를 통해 가장 합리적이고 신뢰성있는 PVD 설계법을 제시하고자 한다.

2. 압밀방정식

* 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, University of Seoul

** 서울시립대학교 토목공학과 박사수료, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, University of Seoul

*** 서울시립대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, University of Seoul

드레인을 이용한 연직배수공법의 주목적은 소요공기 내에 목표 압밀도에 도달하는 것이다. 연직배수재와 관련된 현재까지의 이론적인 흐름은 Terzaghi(1925)의 1차원 압밀이론의 제시이후 방사형의 배수재 설치에 대한 연구로서 대체적으로 Barron(1948), Yoshikuni(1974, 1979), Hansbo(1979), Onoue(1988)로 이어지는 연구가 현재까지의 배수재 적용에 관한 연구의 주축이라고 할 수 있다. 수평과 수직방향의 압밀도를 고려한 평균 압밀도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$U(t) = 1 - (1 - U_v(t)) \cdot (1 - U_h(t)) \tag{1}$$

Hansbo(1979)는 Barron(1948)이 제시한 해에 스미어효과와 웰저항의 효과를 고려하여 다음과 같이 수평방향 압밀도를 제시하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F}\right] \tag{2}$$

$$F = F(n) + F_s + F_r \tag{3}$$

$$F(n) = \ln\left[\frac{D_e}{d_w}\right] - \frac{3}{4} \tag{4}$$

$$F_s = \left[\left(\frac{k_h}{k_s}\right) - 1\right] \left[\frac{d_s}{d_w}\right] \tag{5}$$

$$F_r = \pi z(L - z) \frac{k_h}{q_w} \tag{6}$$

여기서, D_e 는 원형 실린더의 유효직경, d_w 는 드레인의 유효직경, n 은 간극율($n = D_e/d_w$), $F(n)$ 은 드레인의 설치간격에 의한 효과, F_s 는 스미어효과, F_r 은 웰저항 효과, d_s 는 교란된 영역의 직경, k_h 는 교란된 영역에서의 수평방향 투수계수를 나타낸다. 따라서, 연직드레인재가 타입 된 지반의 압밀해석 시 통수능(q_w), 스미어존, 스미어존과 교란되지 않은 지반의 수평투수계수의 비(k_h/k_s), 수평압밀계수(C_h)를 정확히 산정하는 것이 대단히 중요하다.

3. 불확실성 요소의 민감도 분석

연직드레인의 최적설계를 위해서는 압밀에 영향을 주는 요소에 대하여 파라미터분석을 실시할 필요가 있다. 00현장에서 연직배수공법의 파라미터분석을 위해 가장 보편화된 Hansbo의 이론을 적용하였다. 파라미터분석에 적용된 요소는 수평압밀계수, 수평투수계수, 스미어존의 범위, 투수계수감소비, 배수재 통수능력 등의 5가지로 정하였다. 그림 1은 이에 대한 결과를 나타낸 것으로서 영향범위를 동일한 상태에서 각각의 영향요소를 320%까지 크게 증가시켰을 때 압밀도의 크기를 나타낸 것이다

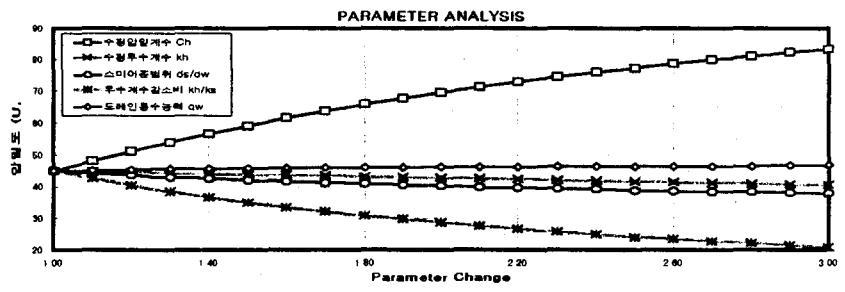


그림 1. PVD에 대한 파라미터 분석결과

그림 1에서 알 수 있듯이 PVD 설치에 의한 방사형 압밀에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 수평압밀

계수로서 보다 최적의 연직배수 공법의 설계를 위해서는 수평압밀 계수를 정확하게 산정하는 것이 가장 중요하리라 판단된다. 그밖에 투수계수 감소비와 스미어존의 범위도 주된 영향요소임을 알 수 있다.

4. 영향요소 평가

연직배수공법의 압밀해석 시 많은 영향을 미치는 드레인의 통수능력과 스미어존의 효과를 정확히 산정하기 위해 현장의 연직배수재 타설 전 원지반, 연직배수재 타설직 후 불교란시료를 채취하여 일반 물성시험과 표준압밀시험, 일축압축시험등을 실시하였으며, 배수재의 통수능력을 평가하기 위해 통수능시험을 실시하였다. 또한 현장 피조콘관입시험을 실시하여 연직배수재의 타설시 멘드렐에 의한 주변지반의 교란영역인 스미어존의 크기와 영향범위, 스미어존에서의 압밀특성과 투수능력 등을 평가하여 실내시험의 결과와 비교해보았다.

4.1 시험시료

표 1. 물리적 특성

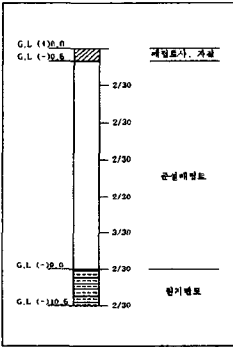


그림 2. 지층개요도

시험 심도	3.0m ~ 4.8m			9.0m ~ 10.3m		
	PVD로부터의 직선 거리 20cm	100cm	170cm	20cm	100cm	170cm
비 중 G_s	2.69	2.68	2.69	2.70	2.70	2.70
간 극 비 e_s	0.825	0.840	1.090	1.398	1.332	1.381
연경도	액성한계 LL	NP	NP	NP	40.0	38.6
	소성지수 PI	NP	NP	NP	19.8	17.5
함 수 비 W_n	31.4%	32.5%	36.0%	48.9%	47.2%	50.7%
#200 통과율	93.1%	69.3%	98.3%	98.8%	99.0%	97.6%
건조단위중량 γ_d	1.474t/m ³	1.456t/m ³	1.287t/m ³	1.126t/m ³	1.158t/m ³	1.134t/m ³
USCS	ML	ML	ML	CL	CL	CL

4.2 연직배수재의 통수능

본 연구에 사용된 통수능 시험장치는 ASTM D 4716에 의한 방법으로, 그림 3과 같이 1991년 Broms 등이 개발한 장치로서 시험방법이 비교적 간단하고 쉽게 배수재의 통수능력을 평가할 수 있다. 시험결과 그림 3에서와 같이 구속용력이 증가함에 따라 통수능이 감소됨을 알 수 있다

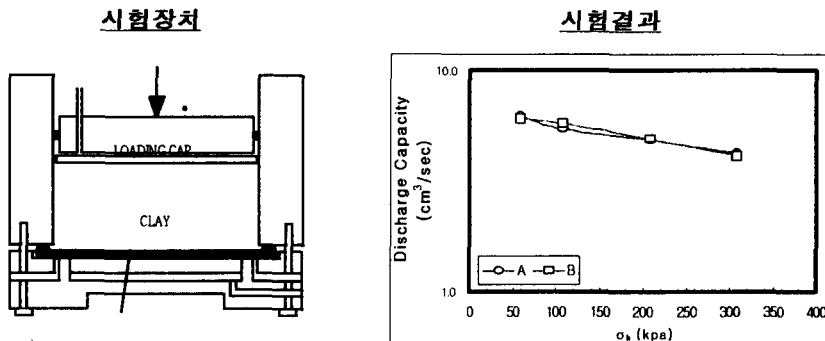


그림 3. 통수능 시험장치 및 시험결과

4.3 스미어 효과

강도증진을 목적으로 한 연약지반에의 연직배수재 타설시 타설장비와 멘드럴에 의한 교란의 영향으로 원지반의 수평방향 투수계수가 교란에 의해 현저히 감소됨으로서 배수공법의 주역할인 배수의 성능을 감소시키고 궁극적으로는 압밀속도를 지연시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 연직배수재 타입 시 발생하는 스미어 효과를 정확히 산정 할 필요가 있다.

4.3.1 실내시험

배수재 타입후 심도 3.0m~4.8m, 9.0m~10.3m에서 배수재 타입위치에서 수평방향으로 20cm, 100cm, 170cm 떨어진 지점에서 불교란시료를 채취하여 압밀시험을 실시하였다. 연직방향의 투수계수는 표준압밀시험을 이용하여 산정하였으며, 수평방향 투수계수는 개량형 압밀시험기를 이용하여 산정하였다.

1) 시험시료의 이방성

그림 4는 압밀시험에 의한 지반의 이방성을 나타내는 것으로써 멘드럴 타입 후, 하중단계별 원지반의 연직투수계수에 대한 거리에 따른 수평투수계수의 비를 나타내고 있다. 그 결과 멘드럴 타입에 의한 교란효과로 타입위치에 근접할수록 수평투수계수의 감소현상이 두드러짐을 알 수 있으며, 배수재의 유효직경을 기준으로 볼 때, 심도3.0m-4.8m의 경우 $k_h = (3.7 \sim 5.4)k_{v0}$, 심도9.0m-10.3m의 경우 $k_h = (3.6 \sim 6.0)k_{v0}$ 로 수평방향 배수를 통한 연직배수공법의 유효성을 입증할 수 있다.

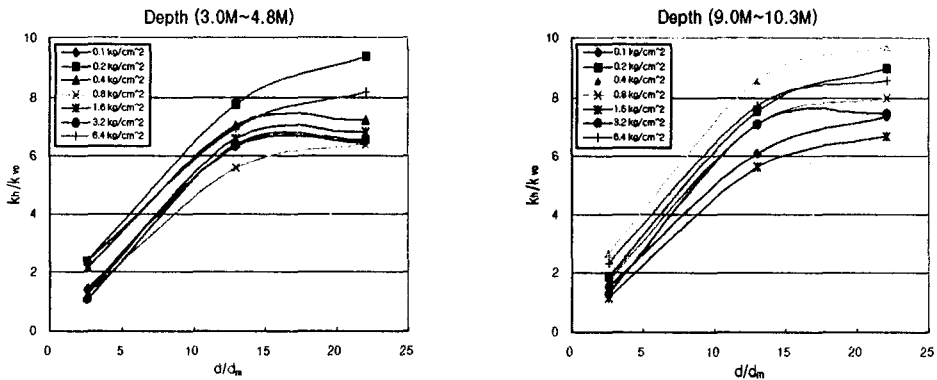


그림 4. 원지반 수직투수계수에 대한 하중단계별 수평투수계수비

2) 교란영역 평가

그림 5는 멘드렐 타입에 의한 거리별 수평투수계수의 감소 영향을 나타내는 것으로 멘드렐 관입위치에 근접할수록 수평투수계수가 감소함을 알 수 있다. 원지반의 수평투수계수에 대한 교란영역의 수평투수계수의 비 즉, k_h/k_{h0} 가 1보다 작은 구간을 교란영역이라 할 수 있으며, 기존에 제시된 결과를 살펴보면, De Mello(1969), Holtz and Holm(1973), Akagi(1977)등은 스미어존의 직경을 멘드렐 직경의 2배로 가정하였으며, Janiolkowski(1981)와 Rixner et al.(1986)은 식(7)과 같이 스미어존의 범위를 정의하였다.

$$d_s = \frac{(5 \sim 6)d_m}{2} \quad (7)$$

따라서, 본 실험결과 심도 3.0m-4.8m의 경우 $d_s = (12.8 \sim 15.1)d_m$ 심도 9.0m-10.3m의 경우 $d_s = (13.2 \sim 14.5)d_m$ 로 기존에 제시된 결과값보다 크게 나타났다. 이는 시료채취 시 발생한 지반교란의 영향 때문이라고 판단된다.

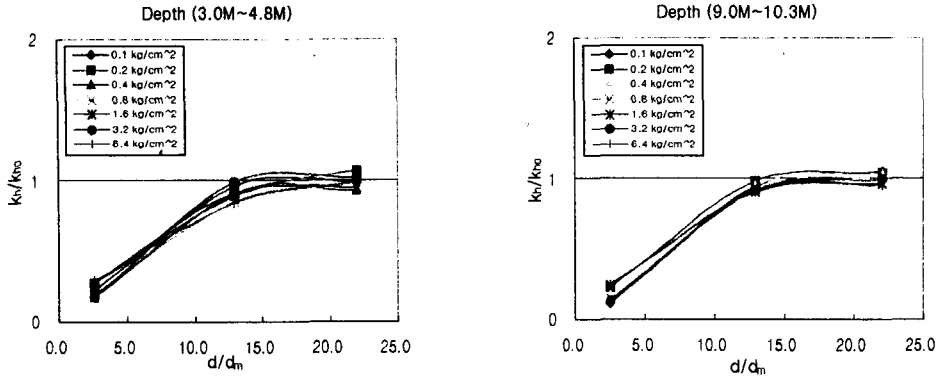


그림 5. 거리에 따른 수평투수계수 감소

4.3.2 현장시험

연직배수채의 타설시 맨드렐에 의한 주변지반의 교란영역인 스미어존의 크기와 영향범위, 스미어존에서의 압밀계수와 투수계수를 평가하기 위해 현장 피조콘관입시험을 실시하였다. 소산시험은 지표면으로부터 3.0, 5.0, 7.0, 9.0m의 일정한 심도에서 PVD의 타입중심점으로부터 10, 20, 30, 40, 80, 300cm의 거리별로 실시하여 스미어존의 영역과 소산양상 등의 압밀특성을 파악하였고, 수평압밀계수를 산출하여 원지반과의 압밀특성 차이를 분석하였다.

1) 소산시험의 결과

깊이에 따른 소산시험 결과, PVD 타입위치로부터 멀어질수록 소산 정도는 보다 빠르게 진행되고 소산율도 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 또한 소산시험 결과에서 심도별로 일정한 소산양상을 보이지 않고 있지만, 전체적으로 볼 때 교란영역과 비교란영역을 구별할 수 있다. 따라서 맨드렐에 의한 주변지반의 교란은 지반의 압밀을 지연시키는 것을 알 수 있으며 이러한 교란정도는 PVD관입 위치에 가까울수록 더 크게 나타나는 것으로 판단된다.

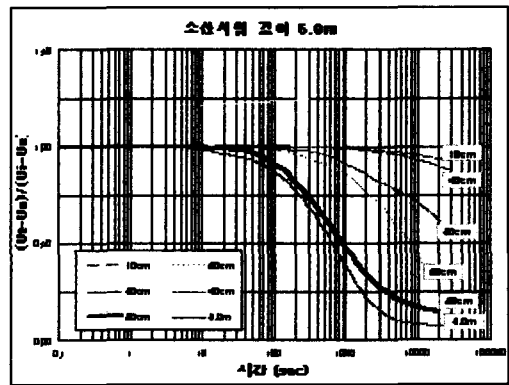
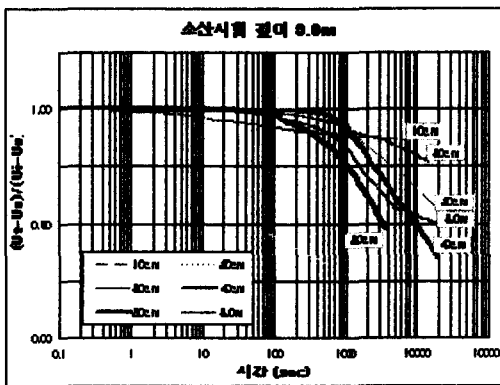


그림 6. 시간에 따른 소산시험의 결과(심도 3.0m)

그림 7. 시간에 따른 소산시험의 결과(심도 5.0m)

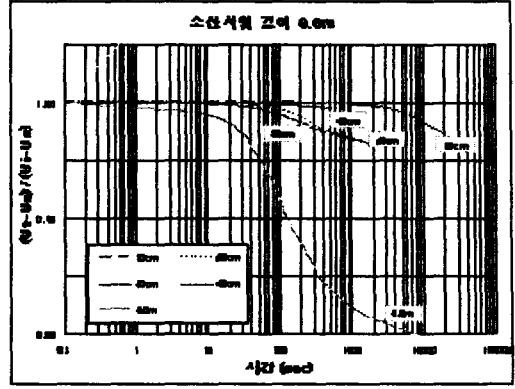
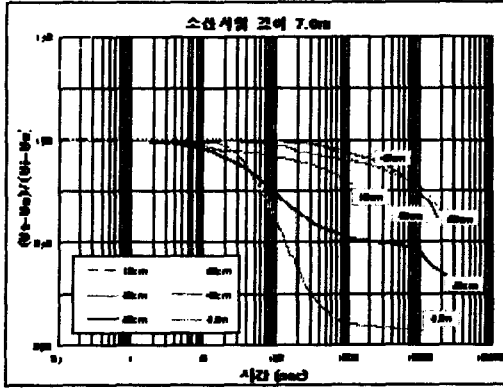


그림 8. 시간에 따른 소산시험의 결과(심도 7.0m) 그림 9. 시간에 따른 소산시험의 결과(심도 9.0m)

2) 수평압밀계수(C_h)의 평가

피조콘관입시험의 소산시험에 의한 수평압밀계수의 평가는 유한요소법과 변위경로법을 이용하여 수평압밀계수를 평가할 수 있는 Housby & Teh(1988)의 방법을 사용하였다. 수평압밀계수와 수평투수계수 중 멘드렐의 타입으로 인해 교란이 발생한 위치와 교란이 발생하지 않은 위치를 판단하기 위해 멘드렐 중심으로부터 거리별로 원지반의 수평압밀계수에 대한 비의 전체적인 변화양상을 나타낸 것이 그림 10이다. 대체적으로 멘드렐의 타입위치에서 멘드렐 직경의 3배 위치를 경계로 교란영역과 비교란 영역으로 구분할 수 있다.

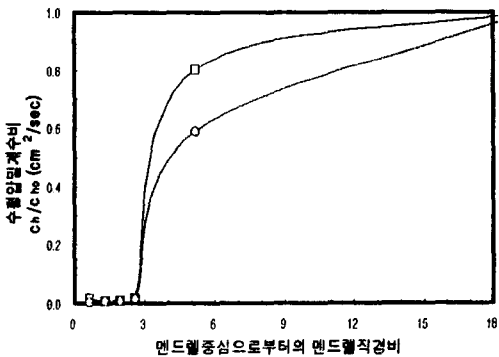


그림 10. 수평압밀계수비의 거리별 변화양상

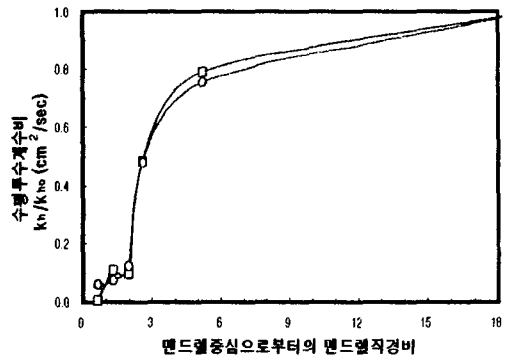


그림 11. 수평투수계수비의 거리별 변화양상

3) 수평투수계수(k_h)의 평가

피조콘관입시험의 소산시험에 의한 수평투수계수는 식(8)로 결정할 수 있다. 따라서, 소산시험에 의한 수평투수계수의 산정은 수평압밀계수와 직접적인 관련이 있음을 알 수 있다.

$$k_h = \frac{\gamma_w}{2.3 \times \sigma'_{v0}} \times RR \cdot C_h \quad (\text{cm/sec}) \quad (8)$$

여기서, RR : 압축비 (Compression Ratio)

σ'_{v0} : 유효 상재하중 (t/m^2)

물의 단위중량 γ_w 는 $1.0t/m^3$ 이며, RR은 표준압밀시험에서 재 압축 시 하중 대 변위의 그래프에서 결정되는 값으로 Baligh & Levadoux는 이 값의 범위를 $0.5 \times 10^{-2} \sim 2 \times 10^{-2}$ 로 추천하였다. 본 현장의 경우에는 이 범위의 중간값인 0.0125를 적용하여 수평투수계수를 계산하였다.

PVD 타설위치에서 거리별 원지반의 수평투수계수에 대한 비의 변화를 그린 그림 11에서와 같이 교란 영역을 맨드릴 직경의 3배라 할 때 교란된 영역과 교란되지 않은 영역의 투수계수의 비 즉, k_h/k_{ho} 의 비는 약 0.14~0.50 정도로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 PVD 설계 시 영향을 주는 요소들에 대하여 현재 실무에서 가장 널리 쓰이고 있는 Hansbo의 압밀방정식을 이용하여 예민도분석을 수행하였고, 이들 영향인자들을 보다 신뢰성있게 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) PVD공법의 설계 시 영향을 주는 요소로는 통수능(q_w), 스미어존, 스미어존과 교란되지 않은 지반의 수평투수계수의 비, 수평압밀계수(C_h) 등이 있으며 예민도분석 결과 수평압밀계수의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있었다. 따라서, 설계 시 수평압밀계수를 정확히 산정하는 것이 가장 중요하다.
- 2) 통수능의 영향은 구속압이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으나, 통수능은 시간에 수렴하는 경향을 보이므로, 단기간에 평가한 통수능보다는 가능한 장시간동안 시험한 결과를 사용하는 것이 바람직하다.
- 3) 배수재 타입시 발생하는 교란정도를 파악하기 위해 실내시험을 수행하였으나, 시료채취의 한계와 교란의 영향으로 정확한 값을 산정 하는데 어려움이 있었다. 스미어존 내의 수평투수계수의 변화양상을 파악하기 위해서는 가능한 드레인재에 인접한 시료를 채취하여 시험을 실시하는 것이 바람직하다.
- 4) 현장소산시험을 실시하여 맨드릴 중심으로부터 거리별 수평압밀계수와 수평투수계수의 변화를 도출한 결과, 교란영역은 맨드릴 직경의 3배정도임을 알 수 있었으며, 교란된 영역과 교란되지 않은 영역의 투수계수의 비(k_h/k_{ho})는 0.14~0.50으로 평가되었다.
- 5) 실내시험과 현장시험의 결과를 비교해 볼 때, PVD 설계에 적용되는 지반계수는 교란의 영향이 최소화될 수 있는 현장시험결과로 분석하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Jamiolkowski, M. and Lancellotta, R., "Consolidation by Vertical Drains-Uncertainties Involved in Prediction of Settlement Rates", Panel Discussion, Proc. of 10th ICSMFE, Stockholm, 1981
2. Onoue, A., Ting, N., Germaine, J. T., Whitman, R. V. and Mori, N., "Smear Zone Around a Drain Pile and Well Resistance of Drains", GEO-COAST 91', pp. 245-250, 1991
3. Barron, R. A., "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans, ASCE, Vol. 113, No. 2346, pp. 718~742, 1948.
4. Hansbo, S., "How to Evaluate the Properties of Prefabricated Drains", Proc. of the 8th ECSMFE, pp. 621~626, 1983.
5. Hansbo, S., "Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains", Ground Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 21~25, 1979.
6. Onoue, A., "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration", Soil and Foundations, Vol. 28, No. 4, pp. 165~174, 1988.