

수치해석에 의한 스미어 존 평가

Evaluation of the Smear Zone by Numerical Analysis Method

강 윤[†] · 남 열우¹⁾ · 이 섬범²⁾ · 김 흥택³⁾

Kang, Yun · Nam, Yelwoo · Lee, Seombeom · Kim, Hongtaek

ABSTRACT : The vertical drain method recently being used in Korea 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 the consolidation time becomes longer than expected in the design. Although the size of the smear zone is a very important factor directly influencing the degree of consolidation, in the existing studies, the general value for the size of the smear zone proposed has been used in the design. However, the size of the smear zone proposed by the existing studies cause a loss of economical efficiency because of the inaccuracy of the design. Hence, in this study, the characteristics on the size of the smear zone were analyzed by carrying out the three dimensional numerical analysis and the method to determine the conversion size of the smear zone considering the change of the coefficient of permeability was proposed in order to consider the change of the coefficient of permeability in the actual design.

Keywords : Smear zone, Numerical analysis, Coefficient of permeability, Consolidation ratio 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 예상한 압밀진행이 원활히 이루어지지 않는 문제점이 발생 된다는 점이다. 스미어 존의 크기는 압밀도에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 설계인자이나, 기존에 수행되는 설계에서는 연구에 의해서 제안된 안전측의 값을 일률적으로 적용하여 설계를 수행하고 있다. 그러나 이러한 방법으로 산정된 스미어 존의 크기는 설계 특성상 불확실성에 대한 과대설계로 진행되어 경제적인 측면에서 큰 손실을 가져올 수 있게 된다. 따라서 이번 연구에서는 3차원 수치해석을 수행하여 스미어 존의 크기에 대한 특성을 분석하고 스미어 존 내부의 투수계수 변화를 고려할 수 있는 스미어 존의 환산크기 결정방법을 제안하여 실제 설계에서 투수계수의 변화에 대한 고려가 가능하도록 하였다.

주요어 : 스미어존, 수치해석, 투수계수, 압밀도, 연직배수

1. 서 론

최근 국내외에서 수행된 연직배수공법은 압밀촉진공법 중의 대표적인 공법으로 하중에 의해 발생된 지반 내의 과잉간극수압을 빨리 소산시키기 위해 지반에 배수재를 타입 함으로써 배수거리를 단축시켜 압밀을 촉진하는 공법이다. 그러나 이러한 연직배수공법은 배수재의 설치시 불가항력적인 스미어 존이라는 교란영역을 발생시킨다. 이렇게 발생된 스미어 존의 특징은 교란으로 인하여 그 영역내의 투수계수가 감소, 설계시 예상하였던 압밀의 진행이 원활히 이루어지지 않는 문제점이 발생하게 된다.

스미어 존의 크기는 연직배수공법 설계시 압밀도에 직접적으로 영향을 미치는 중요한 설계인자이나, 기존에 수

행되는 설계에서는 토질이나 원지반의 투수계수 변화 특성을 고려하지 않고 이전의 연구에 의해서 제안된 값들 중 안전측의 값을 일률적으로 적용하여 설계를 수행하고 있다. 그러나 이러한 방법으로 산정된 스미어 존의 크기는 설계 특성상 불확실성에 대한 안전측의 방향으로 설계를 수행하므로 결국에는 과대설계로 진행되어 경제적인 측면에서 손실을 가져올 수 있게 된다. 최근의 연구에서 장용채 등(2004)은 연직배수재의 설치를 연직 및 수평방향으로 다양하게 변화시켜 수치해석을 수행함으로써 성토시 효율적인 연약지반개량 범위의 형태를 결정하도록 하였으며, 신은철 등(2005)이 자연상태의 연약지반이 아닌 주로 산업활동 부산물인 폐석회로 구성된 지반의 개량시 연직배수재를 사용한 경우에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 지금

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

1) 정희원, (주)신성엔지니어링 지반공학부 부사장

2) 비희원, (주)대우건설 부장

3) 정희원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사

까지의 연구결과로는 배수재 설치시 횡방향으로 변화하는 투수계수 및 압밀계수의 특성을 설계시 고려하는데에 어려움이 따르는 것이 현실이다. 따라서 이번 연구에서는 3차원 수치해석을 수행하여 스미어 존의 크기에 대한 특성을 분석하고 스미어 존 내부의 투수계수 변화를 고려할 수 있는 스미어 존의 환산크기 결정방법을 제안하여 실제 연직 배수재의 설계에서 가장 많이 적용되고 있는 Hansbo(1979)가 제안한 식에 직접적으로 적용하여 투수계수의 변화에 대한 고려가 가능하도록 하였다.

2. 수치해석을 통한 스미어 존 크기 평가

2.1 해석개요

일반적으로 스미어 존의 크기는 $2.0 \sim 3.0D$ (D : 맨드렐의 환산직경)로 알려져 있으며 실제 설계에서도 이와 같은 범위내에서 적용이 되고 있다. 그러나 연구결과에 의하여 제시된 스미어 존의 범위를 보면 $3.0D$ 보다 큰 경우도 볼 수 있으며, 실제로도 $3.0D$ 보다 크게 발생하는 경우를 배제할 수 없는 실정이다. 따라서 본 수치해석을 통하여 맨드렐의 관입 및 인발시 발생하는 스미어 존의 발생영역을 파악하고자 한다. 이번 분석에서는 VisualFEA를 사용하여 3차원 해석을 수행하였으며, 수치해석에 적용된 3차원 격자망은 그림 1과 같다.

모형지반은 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 지반의 요소는 Tetrahedron, 맨드렐은 Frame으로 모델링하였다. 배수재의 배수효과를 응력장에서의 수치해석으로는 모델링할 수 없기 때문에 연직배수재는 모델링하지 않았다. 그러나 맨드렐의 관입을 최대한 유사하게 수치해석으로 모델링하기 위하여 맨드렐은 Frame요소로 하여 맨드렐의 형상을 그대로 모델링 하였으며, 인터페이스를 잘못 고려할 경우에는 오히려 실제 발생하는 간극수압의 값보다 해석 결과가 작게 나타날 가능성이 있다고 생각되므로, 맨드렐

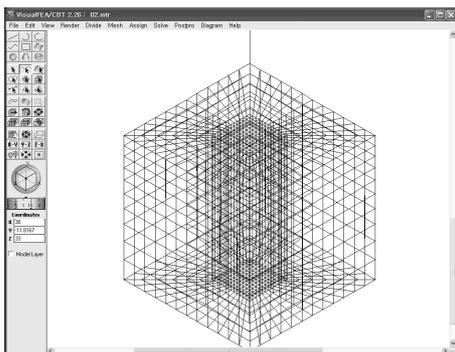


그림 1. 수치해석 격자요소망(스미어 존 크기 평가)

의 인터페이스는 고려하지 않고 지중에 관입된 상태를 모델링 한 후에 각 해석단계별로 일정한 침하량을 유지할 수 있도록 하중을 조정하여 재하하였다. 이번 연구 수치해석에 사용된 모형지반의 특성치는 표 1에 요약, 정리하였다.

2.2 맨드렐 관입시 발생하는 스미어 존

본 분석에서 관입되는 맨드렐은 원형으로 하여 치수효과를 평가하였다. 수치해석에 적용된 관입되는 맨드렐의 직경이 100mm이며, 모형지반의 크기는 10m이기 때문에 맨드렐 직경에 대한 모형지반의 직경의 거리비는 100정도이다. 수치해석 결과는 그림 2에 나타내었다.

그림 2에 의하면 지반의 점착력이 커질수록 전단변형률 값이 커지는 것으로 나타났으며 수렴되는 거리비는 5~15 정도로 나타나 지반의 강도에 의하여 변화가 큰 것으로 나타났다. 이 값은 Onoue 등(1991) 및 Madhav 등(1993)이 제안한 스미어 존의 크기의 범위와 같은 경향을 나타내고 있다. 전단변형률의 경우 지반의 파괴와 관련이 있는 특성이므로 결국 현장에서 맨드렐의 관입에 의해서 지반이 관입전단파괴를 일으키는 메카니즘으로 발생하는 스미어 존의 특성을 어느 정도 반영하는 것으로 볼 수 있으며, 그 결과 스미어 존은 지반의 강도가 강할수록 커지는 경향을 나타내는 것으로 나타났으며 이는 김수삼 등(1997)의 연구결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 그림 3에서는 관입시에 발생하는 최대 전단변형률과 인발시에 발생하는 최대 전단변형률의 분포를 비교하였다.

그림 3을 보면 맨드렐 관입시의 전단변형률의 분포가 맨드렐 인발시의 전단변형률 분포보다 작은 것으로 나타

표 1. 수치해석에 적용된 모형지반 특성치

구 분	단위중량 (kN/m^3)	점착력 (kPa)	내부마찰각 ($^\circ$)	탄성계수 (kPa)	포화충비
점토(CL)	12.0	10~30	0	6500	0.45

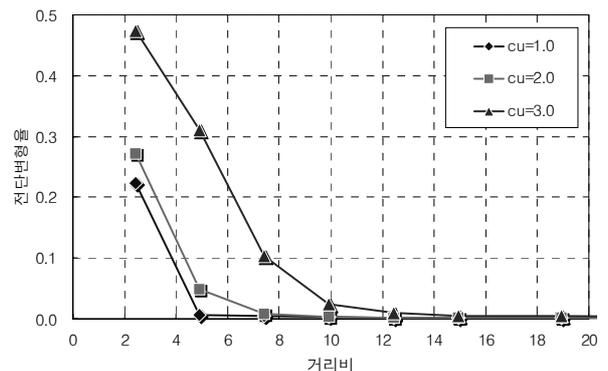
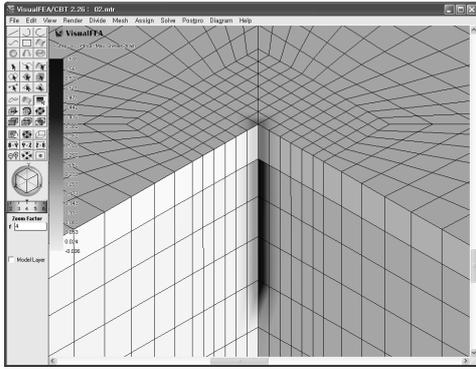
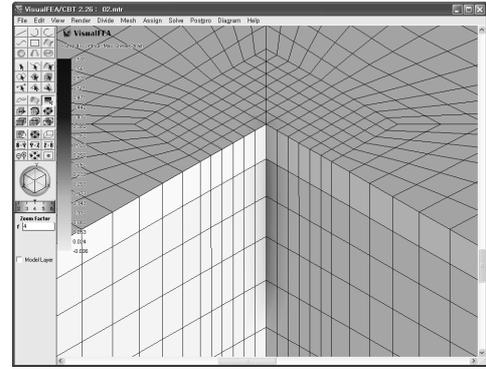


그림 2. 거리비에 따른 전단변형률의 크기



(a) 맨드렐 관입시의 전단변형률



(b) 맨드렐 인발시의 전단변형률

그림 3. 관입 및 인발시 발생하는 최대 전단변형률 분포

났다. 이는 맨드렐의 관입시에는 관입전단파괴에 의한 변형률로써 관입시의 스미어 존의 크기에 대한 평가가 가능한 반면, 맨드렐을 인발할 경우 배수재와 맨드렐 사이의 공간만큼 흠으로 채워지게 되므로 인발시에 발생하는 전단변형률에 의한 스미어 존의 평가는 매우 어렵다. 따라서, 이번 연구에서도 이러한 인발시 발생하는 스미어 존의 특성에 관련된 내용은 고려하지 못하였다.

3. 환산 스미어 존 평가방법

3.1 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. 그러나 연직배수재를 사용하여 연약지반 개량하는 설계에서는 Barron(1948), Yoshikuni 등(1974), Hansbo(1979), Onoue(1988(a),(b)) 등이 제시한 방법들을 주로 사용하고 있으며, 이러한 방법의 경우 일부의 방법에서 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 경험 부족등을 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.

따라서 수치해석을 통하여 스미어 존 내부에서 반경방향의 투수계수의 분포 경향이 압밀도에 미치는 영향을 주요변수를 변화시켜가며 변수분석을 수행하여, 주로 사용되

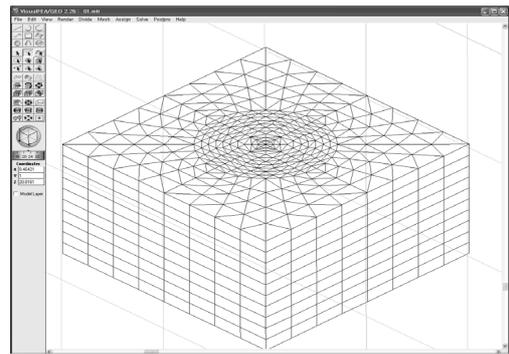


그림 4. 수치해석 격자요소망(스미어 존 특성평가)

고 있는 압밀도 산정방법에 적용이 가능한 스미어 존의 환산크기를 산정하는 방법을 제안하여, 모형 및 현장실험을 통하여 스미어 존의 크기를 결정하는데 참고자료로 활용하고자 한다. 본 해석에서 사용한 해석격자망을 그림 4에 나타내었다.

이번 분석에서는 VisualFEA를 사용하여 3차원 침투해석을 수행하였으며, 스미어 존의 크기는 1.0~10.0D까지 1.0D간격으로 변화하는 것으로 모사하였다. 압밀연동해석을 수행할 경우, 원지반과 스미어 존의 물성치의 차이로 인하여 간극수압의 차이가 발생할 가능성이 있으므로 연동해석을 수행하지 않고, 시간의존 해석을 수행하면서 해석 초기값을 일정하게 입력하는 방법을 적용하였다. 요소 모양은 Hexahedron으로 하였으며, 배수심도는 해석시간을 고려하여 1m로 하였고, 배수재의 설치간격이 2m 인 경우를 모델링 하였다. 배수재의 각 영역은 각각의 배수재로 배수되는 것으로 가정하여 경계조건은 물의 이동이 없는 것으로 하였으며 배수가 연직방향으로 되는 것을 방지하기 위하여 상부의 지표면도 물의 배수가 발생하지 않도록 경계조건을 입력하였다. 스미어 존의 모델링은 배수재를 중심으로 방사형으로 커지도록 모델링을 하였으며, 그 크기는 0.5D로 하여 전체적인 지름이 배수재의 지름만큼씩 커지도록 모델링을 하였다. 또한 투수계수 변화 형태는 다

음의 그림 5에 나타내었으며, 적용된 투수계수 곡선형상 및 지반물성치는 그림 6, 표 2와 같다.

그림 5 및 그림 6에 적용된 곡선의 형태는 지수형태의 곡선과 로그형태의 곡선형태가 혼합된 형태로서, 모형토조 시험 결과에서 나타난 가장 근접한 투수계수 변화형태라고 볼 수 있다. 또한 각각의 곡선은 스미어 존의 크기가 다양하게 변화함으로써 대표값 결정방법이 객관성을 유지 할 수 있도록 다양한 변화형태를 고려하였다. 곡선 1, 2, 3번의 경우 ZONE 1의 크기는 일정하며 ZONE 2의 크기만 변화시킨 곡선형태이며 곡선 4번은 ZONE 1의 영향을 알아보기 위하여 ZONE 1의 크기만 변화시키고 ZONE 2의 크기는 일정하게 하였다. 곡선 5번은 ZONE 1의 크기는 곡선 1, 2, 3번과 같고, ZONE 2의 크기만 변화시켰다. 다만 배수재로부터 멀어질수록 투수계수의 감소폭이 완만하게 유지되도록 하여 ZONE 2의 형태에 따른 영향도 분석하도록 하였다. 곡선 6번은 ZONE 1은 크고 ZONE 2가 짧은

형태로 하였다.

3.2 스미어 존의 환산 크기 산정

실제로 연직배수재 타설시 발생하는 투수계수의 분포변화형상을 고려하여 이와 동일한 압밀도를 갖는 단일 투수계수의 스미어 존의 크기를 알아보고자 하였다. 이번 연구에서는 이러한 환산 스미어 존의 크기를 수치해석을 통하여 알아보고자 단일 투수계수를 적용하여 1.0~6.0D까지의 크기를 갖는 스미어 존에 대한 압밀도와 투수계수의 변화를 거리별로 적용하여 구한 압밀도를 그림 7에 나타내었다. 이 때의 압밀도를 구하는 시간은 스미어 존의 크기가 1.0D인 경우의 압밀도가 99%에 도달한 시간을 기준으로 하여 적용하였다.

그림 7을 보면, 오른쪽 그림이 각각의 곡선형태에 따른 압밀도를 나타낸 곡선이고 왼쪽 그림은 스미어 존의 크기별 압밀도를 나타낸 곡선이다. 오른쪽에서 왼쪽곡선으로 수평방향으로 직선을 그어 왼쪽곡선과 만나는 점에서의 스미어 크기가 환산 스미어 존의 크기라고 할 수 있다. 이러한 방법으로 각각의 곡선형태에 따른 스미어 존의 환산 크기를 표 3에 나타내었다.

표 3을 보면 ZONE 1의 크기가 큰 곡선형태가 대부분 스미어 존의 크기가 큰 것으로 나타났다. 반면에 ZONE 2의 영향은 두 가지로 구별 할 수 있는데, 변화경향을 나타내는 곡선에서 급격하게 투수계수가 변화하는 위치에서

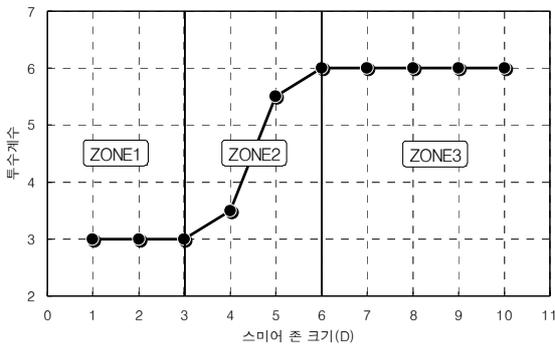


그림 5. 투수계수 변화 구역 구분

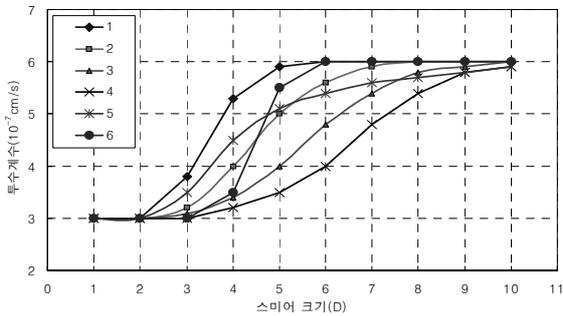


그림 6. 수치해석에 적용된 투수계수 변화 곡선

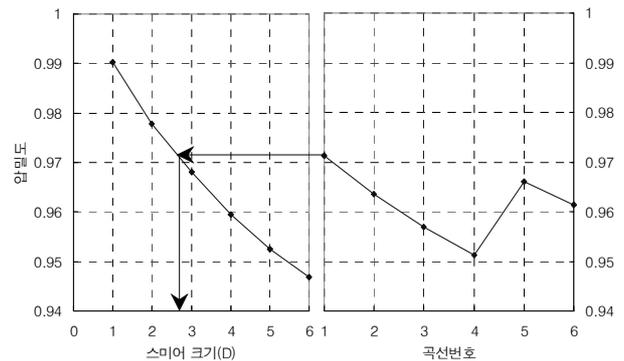


그림 7. 동일한 압밀도를 갖는 스미어존의 환산크기의 결정

표 2. 수치해석에 사용된 물성치(스미어 존 환산크기 결정)

스미어 크기 (D : 환산직경)	투수계수비 (k_w/k_s)	원지반 투수계수 (cm/s)	체적변화계수 (m_v)	배수재 투수계수 (cm/s)
3.0~10.0D	2.0	6.0×10^{-7}	0.032	0.01

표 3. 스미어 존의 환산 크기

곡선번호	1	2	3	4	5	6
스미어 존의 환산크기	2.7	3.5	4.3	5.2	3.2	3.7

나타나는 변곡점을 기준으로 배수재에 인접하고 있는 구역의 투수계수에 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 2번과 5번 곡선을 비교하여 보면 배수재에 인접하고 있는 구역의 투수계수가 큰 2번 곡선의 스미어 존이 더 큰 것으로 나타나 변곡점을 기준으로 배수재에 인접하고 있는 구역의 투수계수의 영향을 더 많이 받는 것으로 판단된다.

이번 수치해석의 결과를 토대로 하여 스미어 존의 환산 크기를 산정하면 그림과 같이 배수재로부터 1.0D 이상 이격된 지점에서 측정된 스미어 존의 투수계수와 원지반의 투수계수의 차이의 20%에 해당하는 값(k_{20})을 스미어 존의 투수계수에 더하여 준 값으로 평행한 직선을 작도하고 (그림 8 참고), 이 직선이 투수계수 변화곡선과 만나는 부분의 스미어 존의 크기가 수치해석결과로 나타난 스미어 존의 환산크기와 유사한 것으로 나타났다. 위에 서술한 방법을 간략하게 순서화하여 나타내면 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 배수재로부터의 이격거리별 수평투수계수 그래프에 위에 식으로 구한 k_{20} 값을 직선으로 도시한다.

(3) 이격거리별 수평투수계수와 도시한 k_{20} 직선과 만나는 점에서의 스미어 존의 크기가 환산크기이다.

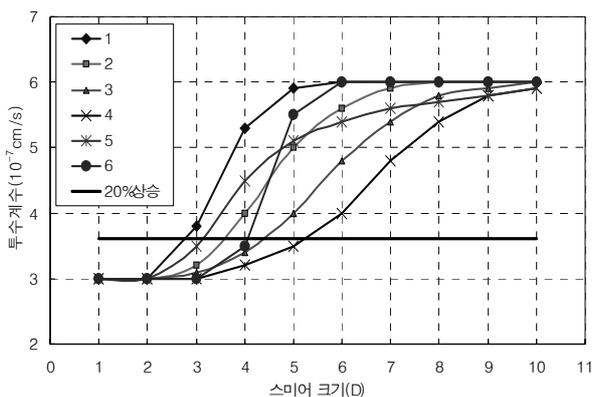


그림 8. 투수계수 변화 곡선에 의한 스미어 존의 환산크기 산정

따라서 현장 및 실내 모형토조실험의 결과가 있는 경우, 기존에 제안된 다양한 이론식을 사용하여 설계에 적용할 수 있는 스미어 존의 환산크기는 이번 연구에서 제안한 방법과 같은 순서에 의해서 결정이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 현장에서도 피에조 콘을 이용한 간극수압의 소산실험결과나, 이장덕 등(2003)이 수행한 현장모형실험에서의 간극수압소산 결과를 이용하여 보다 신뢰성이 높은 스미어 존의 환산크기 및 투수계수 값을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 스미어 존 내부에서 반경방향으로 투수계수가 변화하는 경향이 압밀도에 미치는 영향을 고려한 수치해석을 수행하였으며, 해석결과에 의한 변수분석의 결과를 근거로 하여 설계시 주로 사용되고 있는 압밀도 산정 방법에 적용이 가능한 스미어 존의 환산크기를 산정하는 방법을 제안하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지반의 점착력이 커질수록 전단변형률 값이 커지는 것으로 나타났으며 수렴되는 거리비는 5~15 정도로 나타나 지반의 강도에 의하여 변화가 큰 것으로 나타났으며, Onoue 등(1991) 및 Madhav 등(1993)이 제안한 스미어 존의 크기의 범위와 같은 경향을 나타내고 있다.
- (2) 지반의 강도에 따른 전단변형률의 분포를 분석한 결과 스미어 존의 크기는 지반의 강도가 강할수록 커지는 경향을 나타냈다.
- (3) 본 연구에서는 연직배수재 타설시 발생하는 투수계수의 분포변화형상을 고려하여 이와 동일한 압밀도를 갖는 단일 투수계수의 스미어 존의 크기를 결정하는 방법을 제안하였으며, 본 연구에서 제안된 환산 스미어 존의 크기를 구하는 방법을 토대로 현장에서 맨드렐 관입시 발생하는 수평투수계수를 측정하여 수평투수계수의 분포를 구한 후 환산 스미어 존의 크기를 구하면 보다 효과적인 설계가 수행 될 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김수삼, 장연수, 고정환(1997), 스미어존 형성과 투수성 변화에 미치는 맨드렐의 영향에 관한 연구, 한국지반공학회지, 제 13권, 제5호, 한국지반공학회, pp. 45~57.
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, *한국지반환경공학회 논문집*, 제6권 제2호, pp. 51~60.
4. 이장덕, 구자갑(2003), 현장시험에 의한 Smear Zone의 평가, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 19, No. 6, pp. 207~216.
 5. 장용채, 김주한, 이진수(2004), 유한요소해석을 이용한 연직 배수재의 타설범위에 따른 개량효과에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, 제5권, 제1호, pp. 5~12.
 6. Barron, R. A.(1948), Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, *Trans, ASCE*, Vol. 113, No. 10, p. 2346, pp. 221~228.
 7. Hansbo, S.(1979), Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 21~25.
 8. Hansbo, S.(1981), Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains, *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Stockholm, Sweden Vol. 3, paper 12/22, pp. 677~682.
 9. Madhav, M. R., Park, Y. M. and Miura, N. (1993), Modeling and Study of Smear Zones Around Band Drains, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp. 135~147.
 10. 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.
 11. 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.
 12. Onoue, A. Ting, N-H., Germaine, J.T. and Whitman, R.V. (1991), Permeability of disturbed zone around vertical drains, *Proc. of ASCE Geotech. Engng. Congress*, Colorado, pp. 879~890.
 13. 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)