

연직배수공법의 스미어존이 압밀에 미치는 영향에 관한 수치해석

Numerical Analysis about Effects of Smear Zone in Vertical Drains on Consolidation

유 남 재* 홍 영 길** 우 영 민*** 전 상 현****
Yoo, Nam-Jae Hong, Young-Kil Woo, Young-Min Jun, Sang-Hyun

Abstract

In this paper, an numerical approach is performed to investigate the effects of smear zone, occurred by penetrating vertical drains, on consolidation behavior of soft clay deposits. Such a numerical analysis is applied to the field condition to confirm its applicability. Parametric numerical analyses is carried out to study influencing factors such as permeability in smear zone, boundary of smear zone and discharge capacity of vertical drains on the consolidation of soil.

As results of analyses, for the given conditions of soil, degree of consolidation is getting faster with increase of permeability of vertical drain. Degree of consolidation is delayed with decrease of permeability of smear zone. As the ratio of drain width to smear zone increases, the degree of consolidation decreases. Proposed values of influencing factors by previous researchers is found to be reliable from results of numerical analyses with Cam-clay model.

키워드 : 연직배수 공법, 스미어존, 투수계수, 수치해석
Keywords : vertical drain, smear zone, permeability, numerical analysis

1. 서론

연직배수 공법은 배수재를 지반에 타설하여 배수거리를 단축함으로써 압밀을 촉진하는 방법으로 현장에서 많이 적용되고 있다. 타설된 배수재는 간극수가 배출되는 인공 배수 통로로 이러한 배수재의 투수능력은 중요한 설계인자로 활용하고 있다. 또한, 최근 수치해석 기법의 발달로 많은 지반공학적인 문제를 수치해석으로 해결하고 있으며, 연약지반에서도 다양하게 적용되고 있다. 특히, 유한요소법(Finite Element Method, FEM)과 유한차분법

(Finite Difference Method, FDM) 등이 적용된 2차원, 또는 3차원 해석 상용 수치해석 프로그램이 개발되었으며, 최근 발표된 프로그램은 비전문가도 쉽게 사용할 수 있을 정도이다. 따라서, 본 논문에서는 연직배수 공법에 사용되는 PBD재의 압밀거동 특성을 파악하고자 현장 조건을 모사하기 위하여 PLAXIS 프로그램을 이용하여 유한요소 수치해석을 실시하였다.

멘드렐이 관입됨에 따라 발생하는 스미어 존을 정확하게 평가하기 위해서는 현장시험을 수행하는 것이 가장 바람직하다고 판단되어 현장과 동일한 조건으로 모델링하여 수치해석을 실시하였다. 그리하여 본 논문에서는 실제 현장에서 수행한 지반조사 및 설계 자료가 있는 지역을 선정하여 수행하였다. 국내에 배수재가 주로 시공되는 연약지반 분포지역 중 지반의 물성치가 유사한 그 지역의 대표성을 가질 수 있는 부산광역시 강서구 부근의

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 한림성심대학 토목공학과 교수, 공학박사
*** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정
**** 세경대학 건설환경과 전임강사, 교신저자

00지역을 선정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 배수재의 통수특성

일반적으로 PBD재는 폭 10cm, 두께 3mm 내외의 판형 제품이 많다. 판형의 배수재를 사용하는 경우 단면의 제원은 일반적으로 Kjellman(1948)의 이론에 의해 등가원형 단면으로 환산하여 적용한다. 일반적으로 원형과 비원형 배수재의 면적이나 배수재의 표면이 같다는 동일면적 개념으로 가정하여 배수재의 직경을 환산하는 방법과 반대로 배수 기능은 배수재의 표면을 통해 이루어지므로 면적보다는 배수재의 외주길이를 동일하게 가정하는 동일외주면 개념으로 연직 배수재의 직경을 산정한다. [16]

Fellenius and Wager(1977)는 배수재의 환산직경에 대하여 샌드 드레인의 직경과 관련해 자유외주면적 개념을 제시하였다. PBD가 실제 흐름과 관련하여 PBD내의 공간의 외주면적을 자유 외주면적이라 정의하고, 균질한 모래의 간극률을 0.4라 하였을 때 샌드 드레인의 전체 외주면적의 40%만이 실제 흐름과 관련되므로 외주면적이 자유 표면적이라 할 때 식 (1)과 같은 관계식을 제시하였다. [6]

$$0.4 \times \pi \times d_w \times L = \text{외주면적} (= \text{자유표면적}) \quad (1)$$

여기서, L : 배수재의 길이

PBD의 경우 보통 코어의 형상에 따라 코어와 필터재가 이루는 공간을 가지고 있고, 코어가 접촉한 부분은 흐름이 거의 발생하지 않는다. 따라서 배수재의 흐름은 코어내의 흐름공간에 의해 배수가 이루어진다고 할 수 있다. 만약 이때 흐름공간과 배수재 전체의 단면적과의 비를 산출하고 이러한 관계를 배수재의 간극률이라고 하면 식(1)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_w = 5n_d \frac{(a+b)}{\pi l} \quad (2)$$

여기서, PBD내의 흐름 통로 외주 : $2n_d(a+b)$

PBD의 간극률 : n_d

a, b : 배수재의 폭, 두께

Hansbo(1979)는 직사각형 형태의 배수재는 주변 둘레 길이가 같은 원형 배수재와 동일한 압밀 효과를 나타낸다고 가정하여 식(3)과 같은 산정법을 제안하였다. [8]

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (3)$$

여기서, a, b 는 각각 배수재의 폭과 두께를 나타낸다.

Rixner et.al.(1986)은 Hansbo의 제안식을 바탕으로 유한요소 해석에 따라 현장 여건을 고려한 실제 지반에서의 환산 직경을 식(4)와 같이 제안하였다. [18]

$$d_w = \frac{(a+b)}{2} \quad (4)$$

하지만, 직사각형 배수재 내의 간극수는 원형 배수재에 비하여 그 흐름이 원활하지 못하기 때문에 Jansen and Hoedt (1986)는 배수재 내의 물의 흐름에 대한 유효성에 의문을 제기하여 등가직경의 산정식을 식(5)와 같이 제안하였다. [14]

$$d_w = \frac{\pi}{4} \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (5)$$

또한 Fellenius and Castonguay(1985)는 c_h 값이 불확실하고, 침하량과 간극수압을 통한 압밀도 산정 결과의 차이에 대하여 실제 PBD의 등가경은 위 식의 d_w 보다 1.5~3.0 배 정도 클 것이라고 판단하여 식(6)과 같은 식을 제안하였다. [5]

$$d_w = 1.5 \sim 3.0 \times \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (6)$$

Suit et al.(1986)은 13종류의 배수재에 대한 평균적인 등가직경이 38~64mm범위에 있다고 하였으며, Kamon (1991)은 실내, 현장실험을 통하여 밴드형 배수재의 단면적은 동일한 단면적을 가진 배수재와 같은 효과를 나타낸다는 동일면적 개념을 통하여 식(7)과 같은 등가직경 산정법을 제안하였다. [15][19]

$$d_w = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}} \quad (7)$$

박영목(1994)은 압밀시험을 수행함으로써 배수재의 등가경에 대한 실험을 통하여 식(8)과 같은 산정법을 제안하였다. [1]

$$\frac{(a+b)}{2} < d_w \leq \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (8)$$

이 외에 Prandhan et al.(1993)은 삼축압밀시험 장치를 이용하여 배수재를 설치한 점토 시료에 대하여 K_0 시험을 실시하였고, 이를 통해 측정된 변위와 간극수압으로부터 압밀도를 산정한 후 Barron(1948)의 방사형 압밀이론을 이용해 배수재의 등가직경을 역으로 산정하는 방법을 제안하였

다. 표 1은 여러 연구자들에 의하여 제시된 배수재 환산직경 산정식을 나타내고 있다. [2][17]

표 1. 제안자에 따른 배수재 환산직경 산정식

제안자	d_w 산정 제안식
Fellenius & Wager (1977)	$d_w = 5n_d \frac{(a+b)}{\pi l}$
Hansbo (1979)	$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi}$
Jansen & Hoedt (1983)	$d_w = \frac{\pi}{4} \frac{2(a+b)}{\pi}$
Fellenius & Castonguay (1985)	$d_w = (1.5 \sim 3.0) \times \frac{2(a+b)}{\pi}$
Suits et al (1986)	38 ~ 64 mm
Rixner et al (1986)	$d_w = \frac{(a+b)}{2}$
Kamon et al (1991)	$d_w = \sqrt{\frac{4ab}{\pi}}$
박영목 (1994)	$\frac{(a+b)}{2} < d_w \leq \frac{2(a+b)}{\pi}$

고려하고 범위는 d_s/d_w 로 평가한다. 하지만 교란 전후의 투수계수비와 교란범위를 신뢰성 있게 평가하는 것은 쉽지 않으며 이에 대한 연구가 여러 연구자들에 의하여 진행 중이다.

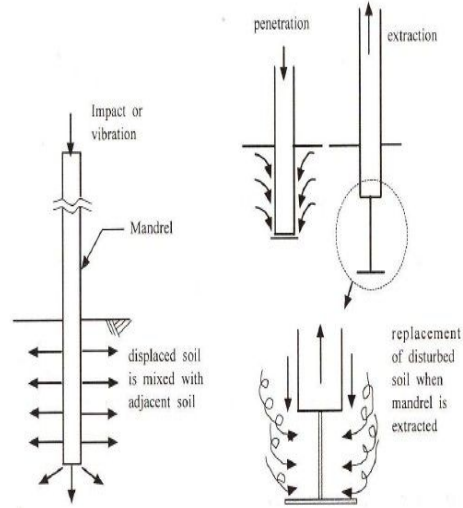


그림 1. 멘드렐 관입의 스미어존 발생개념

2.2 배수재 타입시 교란효과

멘드렐을 관입시 멘드렐의 체적에 해당하는 만큼의 흙이 비배수전단상태로서 방사방향으로 이동하게 되며 이에 따라 주변지반의 교란이 발생하게 된다. 따라서 폐단말뚝을 지반에 타설할 때의 주변지반의 교란과 그 특성이 매우 유사하다. 하지만 폐단말뚝타설시 주변지반의 교란과는 크게 차이가 발생하는 점은 인발과정에서 멘드렐과 배수재사이의 빈 공간으로 이동했던 지반이 제차 이동하면서 2차적인 교란이 발생한다는 점이다. 이와 같은 현상을 그림 1에 모식적으로 나타내었다.

이러한 교란영역은 멘드렐의 크기, 모양, Soil Macromfabric, 예민비, 설치 방법 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 연직 배수재 타설 과정에서 발생한 지반내의 교란영역을 Smear Zone이라고 한다. 지반 교란은 지반의 투수계수의 감소와 지반의 강도감소의 요인으로 알려져 있다.

따라서 기 제안된 해석방법들에서는 Smear Zone의 발생으로 인한 영향을 두 가지 차원에서 검토하여 압밀과정 전반적으로 미치는 영향을 평가하게 되는데 이는 투수성의 감소와 교란영역의 범위이다. 스미어존의 투수성감소는 교란전후의 수평방향 투수계수비, k_h/k_s ,로서 이에 대한 영향을

표 2. 스미어존의 범위에 대한 경험식

Researchers	Proposed
Hansbo et al.(1981)	멘드렐의 영향은 고려하지 않고 배수채의 직경 (d_w)과 스미어존의 지경 (d_s)의 비 ($d_s/d_w=1.5$)를 사용
De Mello(1969), holtz and Holm(1973), Akagi(1977)	스미어존의 직경을 멘드렐 직경의 2배로 가정
Jamiolkowski (1981) Rixer 등(1986)	$d_s = \frac{(5 \sim 6)d_m}{2}$ (d_s, d_m : 스미어 및 멘드렐의 직경)
Hansbo(1987)	$d_s = 2d_m$
Bergado 등(1991)	스미어존 범위가 멘드렐 직경의 2배
Park 등(1985)	$d_s/d_m=1.5$
朴(1994)	실내시험 $d_s=2 \sim 3d_m$ 현장시험 $d_s=5 \sim 7d_m$

표 3. 교란영역 내의 투수계수 제안식

Source	d_s/d_m
박 (1994)	$k_s/k_h = 0.55$
산정방법	대표적인 점성토 지반의 스미어존과 교란투수계수를 측정하여 적용한 결과 적용
Hansbo (1987)	$k_s = k_v$
산정방법	-
해안매립과 연약지반개량을 위한 신기술 개발 보고서(1996)	$k_s/k_h = 0.5$ $k_s = k_v$
산정방법	모형토조 실험후 수평으로 채취된 시료에 대하여 수평투수시험을 실시
연약지반의 압밀특성에 관한 연구보고서 (1999)	$k_s/k_h = 0.6 \sim 0.86$
산정방법	수평으로 채취된 시료로 압밀시험을 실시하여 산정
비고	k_s : 스미어존 투수계수 k_h, k_v : 원지반 수평, 수직 투수계수

3. 수치해석 조건

수치해석에 필요한 조건들은 현장과 동일하게 아래와 같이 적용하였다.

시료의 초기 함수비는 $w_0 = 72.7\%$ 이고 $e_0 = 1.97$ 로 입력하였고, 압축지수 $C_c = 0.81$, 팽창지수 $C_s = 0.09$ 를 적용하였다. 또한, 시료의 수평투수계수 $k_h = 1.73 \times 10^{-4} m/day$ 와 연직투수계수 $k_v = 8.64 \times 10^{-5} m/day$ 를 적용하였고, 스미어존의 투수계수는 시료의 0.5배인 $k_s = 8.64 \times 10^{-5} m/day$ 를 적용하였다. 또한, 배수채의 투수계수는 현장에서 쓰이는 것으로 $3.37 m/day$ 를 적용하였다.

이와 같은 입력조건 내용들을 아래의 표 4에 나타내었으며, 수치해석 모델은 그림 2에 나타내었

다. 현장조건과 비슷하게 압밀 층은 20m, 배수재 간격은 1.2m로 하였다.

표 4. 현장조건에 따른 수치해석 입력조건

	배수재	시료
k_v (m/day)	3.37	8.64×10^{-5}
k_h (m/day)	3.37	1.73×10^{-4}
k_s (m/day)	-	8.64×10^{-5}
e_0	1.97	1.97
C_c	0.81	0.81
C_s	0.09	0.09

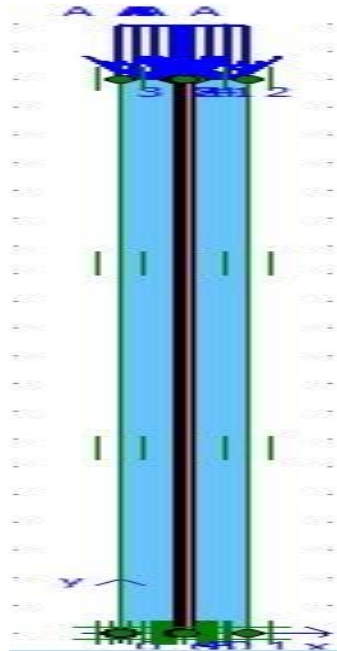


그림 2. 현장조건의 수치해석 모델

압밀하중은 경향성만 파악하기 위해 50kpa와 100kpa의 두 단계로 재하 하였으며, 1단계 압밀 시간은 3개월, 2단계 압밀시간은 9개월로 적용하였다. 그림 3에 수치해석 단계를 나타내었다.

Identification	Phase...	Start f...	Calculation	Loading input	Time	Water	First	Last
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0.00 day	0	0	0
✓ Saturated stage	1	0	Consolidation	Staged Construction	1000.00 day	0	1	14
✓ 50kpa	2	1	Plastic	Staged construction	0.00 day	2	15	57
✓ consol	3	2	Consolidation	Staged Construction	90.00 day	2	58	445
✓ 100kpa	4	3	Plastic	Staged construction	0.00 day	4	446	451
✓ consol	5	4	Consolidation	Staged Construction	270.00 day	4	452	599

그림 3 현장조건의 수치해석 단계

4. 스미어존의 매개변수 적용성

4.1 배수재의 투수계수 변화에 따른 압밀 침하 특성

그림 4와 그림 5는 배수재의 투수계수 변화에 따른 시간-침하량 비교 곡선이다. 그림 4는 배수재의 투수계수 3.37m/day를 기준으로 하여 10배씩 증가시켜 해석하였고, 그림 5는 10배씩 감소시켜 해석해 보았다. 그림 4는 배수재의 투수계수가 커질수록 시간에 따른 침하는 빨라지면서 최종 침하량은 같아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림 5는 배수재의 투수계수가 작아질수록 침하량은 작아지지만 시간이 지나면 같아지는 것을 볼 수 있다. 3.37m/day와 0.337m/day의 경우 12개월에 침하량이 수렴하였지만, 0.0337m/day의 경우는 배수재의 투수계수가 너무 낮아서 침하량이 수렴되기까지 약 90개월이 소요되었다는 것을 볼 수 있다. 이것들은 배수재의 투수계수가 증가할수록 압밀도는 빨라진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 현장조건에 대한 입력정수들이 Cam-clay 수치해석 모델링을 했을 때, 잘 적용되었다는 것을 알 수 있다.

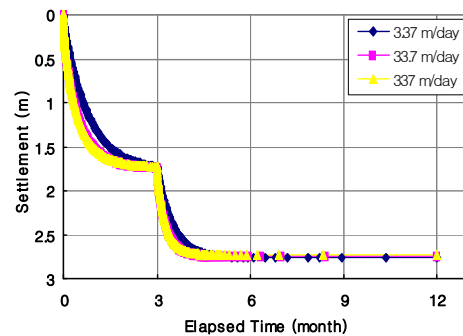


그림 4. 투수계수 변화에 따른 시간-압밀 침하량 비교 곡선

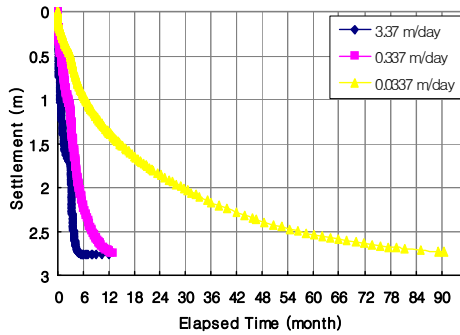


그림 5. 투수계수변화에 따른 시간-압밀침하량 비교 곡선

4.2 스미어존의 범위에 따른 압밀침하 특성

朴(1994)은 실내시험 $d_s = 2 \sim 3d_m$ 이고, 현장시험 $d_s = 5 \sim 7d_m$ 이라고 제안하였다. 그리하여 본 장에서는 $d_s = 5 \sim 7d_m$ 에 대하여 분석해 보았다.

그림 6은 스미어존 범위에 따른 시간-침하 비교 곡선이다. 이 그림 6에서는 스미어존의 범위에 따라 침하량은 비슷하게 나타났다. 그리하여 시간에 따른 단계별 압밀도를 각 하중단계에 대하여 Hoshino의 \sqrt{t} 법에 의해 침하량에 대한 평균 압밀도를 산정해 보았으며, 그림 7에 나타내었다.

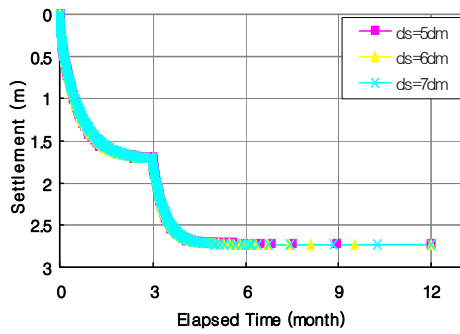
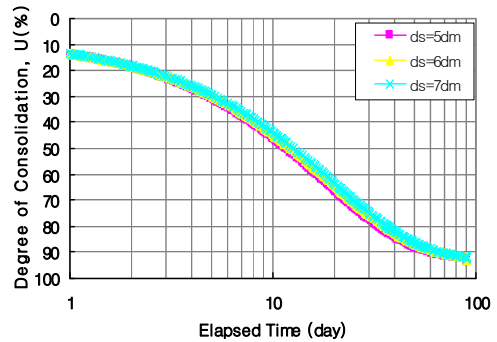
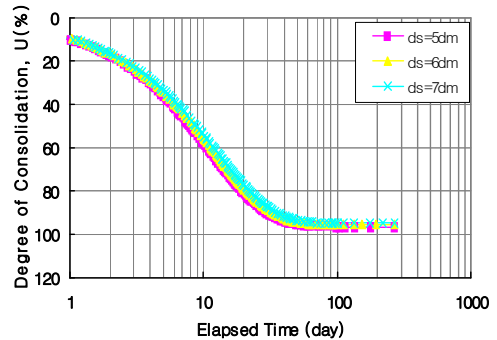


그림 6. 스미어존 범위에 따른 시간-압밀침하량 비교 곡선



(a) $\sigma'_c = 50kpa$



(b) $\sigma'_c = 100kpa$

그림 7. 스미어존의 범위에 따른 단계별 시간-압밀도 비교 곡선

그림 7에서와 같이 스미어존의 직경비가 증가할수록 압밀도는 50kpa 에서는 93.3%~92.6%, 100kpa 에서는 96.5%~95%로 미세하게 감소한다는 것을 알 수 있었고, 그 감소폭은 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 각 스미어존의 범위에 따른 압밀도 산정결과를 표 5에 나타내었다.

표 5. 스미어존의 범위에 따른 압밀도 산정결과

직경비	5	6	7
50kpa	93.3%	92.8%	92.6%
100kpa	96.5%	95.7%	95%

4.3 스미어존의 투수계수 변화에 따른 압밀침하특성

앞의 2.2절에서의 표 3과 같이 각 제안자와 보고서에 의하면 k_s/k_h 의 범위는 각기 조금씩 다르

게 표현하고 있다. 그 표 3의 범위에서 본 장에서는 $k_s/k_h = 0.5 \sim 0.8$ 을 적용하여 분석해보았다.

그림 8은 스미어존의 투수계수 변화에 따른 시간-침하 비교 곡선이다. 이 그림 8에서는 스미어존의 투수계수 변화에 따른 침하량은 비슷하게 나타났다. 그리하여 시간에 따른 단계별 압밀도를 각 하중단계에 대하여 Hoshino의 \sqrt{t} 법에 의해 침하량에 대한 평균 압밀도를 산정해 보았으며, 그림 9에 나타내었다.

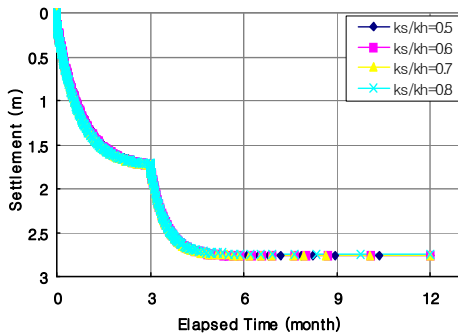
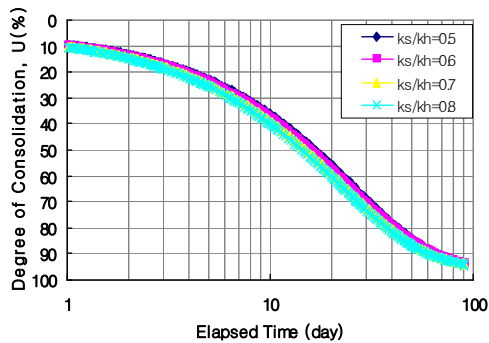
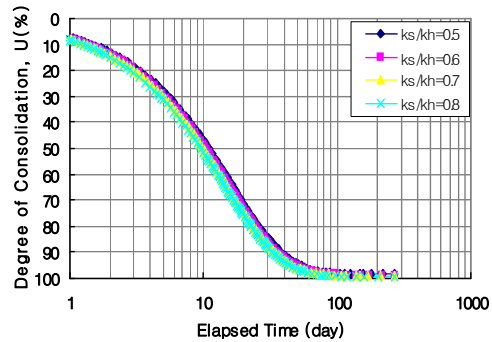


그림 8. 스미어존의 투수계수 변화에 따른 시간-압밀침하량 비교 곡선



(a) $\sigma'_c = 50 kpa$



(b) $\sigma'_c = 100 kpa$

그림 9. 스미어존의 투수계수 변화에 따른 단계별 시간-압밀도 비교 곡선

그림 9와 표 6에서와 같이 스미어존의 투수계수 감소비가 증가할수록 50kpa 에서는 94.4%~94%, 100kpa 에서는 99.3%~98.5%로 미세하게 압밀도는 감소한다는 것을 알 수 있었다.

그러므로 각 매개변수 변화에 따라서 Cam-clay 수치해석 모델링이 잘 되었으며, 입력정수들은 잘 적용되어진 것으로 판단된다.

표 6. 스미어존의 투수계수 변화에 따른 압밀도 산정결과

감소비	0.5	0.6	0.7	0.8
50kpa	94%	94.1%	94.3%	94.4%
100kpa	98.5%	98.9%	99%	99.3%

5. 결론

본 연구는 연직배수공법의 일환으로 사용되는 PBD 공법에 대한 압밀 거동 특성을 파악하고자 현장조건에 대한 수치해석을 실시하여 수치해석의 적용성에 대하여 분석하였다. 또한, 연직배수제를 시공할 때 멘드렐의 관입으로 인하여 발생하는 스미어존에 대하여 분석하였으며, 압밀에 가장 중요한 요소인 배수제의 투수계수에 대한 적용성과 스미어존을 고려한 각 매개변수 변화에 대한 적용성을 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Cam-clay 모델을 사용한 수치해석으로 스미어존의 투수계수 변화를 고려한 연직배수제의 압밀거동을 모사할 수 있었다.

(2) Cam-clay 모델 수치해석결과, 배수제의 투수계수가 증가할수록 압밀도는 빨라지는 것을 확인하였다.

(3) 스미어존의 직경비가 증가할수록 압밀도는 감소하고, 그 감소폭은 점차 작아진다는 것을 알 수 있었고 제시된 이론식의 스미어존의 직경비가 적정함을 확인할 수 있었다.

(4) 스미어존의 투수계수 감소비가 증가할수록 압밀도는 미세하게 감소한다는 것을 알 수 있었고 제시된 스미어존 내의 투수계수 제안식이 적합한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 박영목, “현장조건을 고려한 플라스틱 보드 드레인의 성능평가”, *Geosynthetics Conference*, pp.91~100, 1994.
- [2] Barron, R. A., “Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells”, *ASCE*, Vol.113, No.2346, pp.718~742, 1948.
- [3] Bergado, D. T., et.al, “Smear Effects Vertical Drains on Soft Bangkok Clay”, *ASCE*, Vol.117, No.10, pp.1509~1530, 1991.
- [4] Den Hoedt, G., “Laboratory Testing of Vertical Drains”, *Proceeding of 10th ICSMFE*, Vol.1, Stockholm, pp.627~630, 1981.
- [5] Fellenius, B.H. and Castonguay, N.G., “The Efficiency of Band Shaped Drains - A Full Scale Laboratory Study”, *Report to National Research Council and the Industrial Research Assistance Programme*, 54 p. 1981.
- [6] Fellenius, B. H., Wager, O., “The Equivalent Sand Drain Diameter of the Band-Shaped Drain”, *Proc. of 9th ICSMFE, Tokyo*, Vol.3, pp.395~396, 1977.
- [7] De Mello, V. F. B., “Foundation of Building on clay”, *A state of the Art Report, Proc. of 7th ICSMFE*, Mexico City, pp.49~136, 1969.
- [8] Hansbo, S., “Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains”, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 21~25, 1979.
- [9] Hansbo, S., “Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains” *Proc. of 10th ICSMFE*, Stockholm, Vol3, pp.677~682, 1981.
- [10] Hansbo, S., “Fact and Fiction in the Field of Vertical Drainage”, *Prediction and performance in Geotechnical Engineering*, Calgary, pp. 61~72, 1987.
- [11] Hansbo, S., “Aspects of vertical drain design: Darcian or non-Darcian flow”, *Geotechnique* 47, No. 5, pp.983~992, 1997.
- [12] Holtz, R. D. and Holm, G., “Excavation and sampling around some drains at Ska-Edeby, Sweden”, *Proc. Nordic Geot. Meeting, Trondheim*, Norw., Geot. Inst., Oslo, 1973.
- [13] Jamiolkowski, M. and Lancellotta, R., “Consolidation by Vertical Drains-Uncertainties involved in Prediction of Settle Rates”, *Panel Discussion, Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 1981.
- [14] Jansen, H. L., Den Hoedt, G., “Vertical Drains : In-situ and Laboratory Performance and Design Considerations in Fine Soils”, *Proc. of 8th ECSMFE*, Vol.2, Helsinki, pp.647~651, 1986.
- [15] Kamon, M., Pradhan, T. B. S. and Suwa, S., “Evaluation of Design Factors of Prefabricated Band-Shaped Drains”, *GEO-COAST 91*, pp.329~334, 1991.
- [16] Kjellman, M., “Accelerating consolidation of fine grained soils by means of cardboard wicks”, *Proc. 11th Conf. Soil Mech.*, Rotterdam, No.2, pp.302~305, 1948.
- [17] Pradhan, T. B. S., Imai, G., Kamon, M., and Suwa, S., “Experimental Study on the Equivalent Diameter of a Prefabricated Band-shaped Drain”, *Proceedings of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Singapore, 1993.
- [18] Rixner, J. J., Kremer, S. R. and Smith, A. D., “Prefabricated Vertical Drains, Vol. II : Summary of Research Effort”, *FHWA*, Research Report No. FHWA/RD-86/169, Washington, 1986.
- [19] Suits, L. D., Gemme, R. L., Masi, J. J., “Effectiveness of Prefabricated Drains on Laboratory Consolidation of Remolded Soils”, *Consolidation of Soils : Testing and Evaluation, ASTM*, pp.663~683, 1986.