

관입식 통수능 실험의 수치해석

Numerical Analyses about Test Results of Discharge Capacity Apparatus Using Penetration Method

유남재¹⁾, Nam-Jae Yoo, 우영민²⁾, Young-Min Woo, 전상현³⁾, Sang-Hyun Jun

¹⁾ 강원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon University

²⁾ 강원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kangwon University

³⁾ 세경대학 건설환경과 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Saekyung University

SYNOPSIS : This thesis is results of numerical analyses about test results of discharge capacity apparatus using penetration method.

Applicability of numerical approach with FEM technique, using Cam-clay model, was confirmed by analyzing the results of standard consolidation test before analyzing test results of discharge capacity apparatus using penetration method. Thus, input parameters for the model was convinced to be appropriate.

For numerical analyses about test results of discharge capacity apparatus using penetration method, identical initial and loading conditions during tests were applied to simulate test results correctly. Effects of ground disturbance resulted from installment of vertical drains on the behaviors of consolidation were also simulated.

Applicability of numerical approach was investigated by comparing test results with numerical ones. As results of them, both of consolidation settlement were found to be in good agreements so that its applicability was confirmed.

As results of numerical estimation, degree of consolidation with the condition of considering smear zone was found to be delayed, compared with results without smear zone. On the other hands, parametric numerical analyses of changing parameters related to smear zone such as permeability and size of smear zone and permeability of vertical drain were also carried out.

Keywords : vertical drain, smear zone, permeability, numerical analysis

1. 서론

본 논문에서는 연직배수 공법에 사용되는 PBD재의 압밀거동 특성을 파악하고자 현장 조건과 유사하게 Mandrel을 이용하여 배수재를 타설할 수 있고 압밀과 통수능 시험을 병행할 수 있는 실내 실험을 실시한 결과(김동건, 2007)를 바탕으로 PLAXIS 프로그램을 이용하여 유한요소 수치해석을 실시하였다.

관입식 복합 통수능 실험에서는 배수재의 타설을 위하여 선행 압밀을 통해 소정의 강도를 갖는 지반을 조성한 후 Mandrel 관입장치를 이용하여 배수재를 타설하였다. 이후 단계별 하중을 주어 이에 대한 압밀 침하 특성을 측정하였다.

유한요소 수치해석을 이용한 압밀거동 특성 분석을 위해 먼저 표준압밀 실험에 대한 모델링을 하여 입력정수 및 구성모델에 대한 적합성을 검토하였다. 통수능력 실험결과에 대한 수치해석은 실험의 초기 조건이나 시간, 압밀하중 등을 동일하게 모델링하여 배수재 타설 조건과 타설된 배수재에 의한 지반교란 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 수치해석 결과와 실험결과를 비교분석하여 압밀거동에 대한 유한요소 해석의 적용성에 대해 살펴보았고, 매개변수에 변화를 줌으로써 그 적정성에 대해 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 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 재차 이동하면서 2차적인 교란이 발생한다는 점이다. 이와 같은 현상을 그림 2.1에 모식적으로 나타내었다.

이러한 교란영역은 멘드렐의 크기, 모양, Soil Macrofabric, 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 기제안된 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 고려하고 범위는 d_s/d_w 로 평가한다. 하지만 교란전후의 투수계수비와 교란범위를 신뢰성 있게 평가하는 것은 쉽지 않으며 이에 대한 연구가 여러 연구자들에 의하여 진행 중이다.

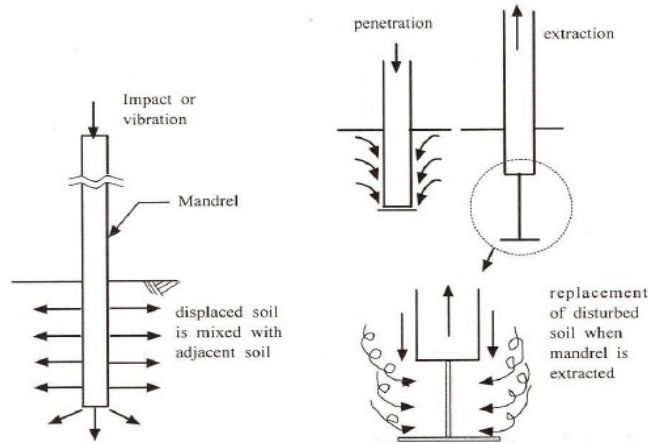


그림 2.1 멘드렐 관입에 의한 스미어존 발생개념

표 2.2 스미어존의 범위에 대한 경험식

Researchers	Proposed
Hansbo et al.(1981)	멘드렐의 영향은 고려하지 않고 배수재의 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)	$d_s/d_m = 1.5$
박(1994)	실내시험 $d_s = 2 \sim 3d_m$ 현장시험 $d_s = 5 \sim 7d_m$

표 2.3 교란영역(스미어존) 내의 투수계수 제안식

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

3. 실험내용

3.1 표준압밀 실험

표준 압밀 시험은 물로 포화된 점성토에 연직하중을 점증적으로 가하여 시간에 따른 침하량을 측정함으로써 점성토의 압축계수, 팽창계수, 체적변화계수, 압밀계수, 투수계수를 구하였다. Kaolinite를 120%의 함수비 조건으로 19.61kPa의 하중까지 선행압밀 시킨 후 재성형된 시료와 선압밀을 하지 않고 단순히 함수비와 간극비를 고려하여 교반한 조건의 2가지 시료를 사용함으로써 시료성형방법에 따른 압밀특성을 비교하였다.

3.2 기존의 통수능 실험

직경 50cm, 총 높이 125cm의 강관 실린더로서 편의상 5단으로 분할되어 있다. 실린더 내부에는 배수재를 설치할 수 있는 클램프와 재하판 등이 설치되어 있다.

실험방법은 평균함수비 90% 조건으로 시료를 교반하여 강재토조 높이 90cm로 시료를 타설하고 시료 중간 높이의 배수재로부터 5cm, 10cm 위치에 간극수압 측정용 관을 매설하였다. 배수재는 실제 시공 시 적용되는 폭 100±0.5mm, 두께 4±0.5 mm, 투수계수 3.9×10⁻³ cm/sec인 하모니카 형상의 기성 PBD재를 사용하였고, 상세방법은 다음과 같다.

- ① 시료 교반이 완료되면 토조조립 후 하부 클램프에 배수재를 설치한다.
- ② 배수재 설치 후 시료 타설이 완료되면 하루정도 포화를 시킨다.
- ③ 압밀 하중 50kpa, 100kpa, 150kpa, 200kpa의 단계로 3일의 시간동안 압밀을 유도한다.

3.3 관입식 통수능 실험

시험기 제원은 기존의 통수능 시험기와 동일하며, 관입식 복합 통수능 시험의 가장 큰 특징은 현장에 서와 같이 Mandrel을 이용하여 배수재를 타설한 다음 통수능 시험을 수행하는 점에 있다.

실험방법은 액성한계 2배의 함수비(≒120%) 조건으로 시료를 교반하여 일정기간동안 방치함으로써 충분히 포화될 수 있도록 하였다. 그리고 시료 높이를 약 105cm정도로 타설하였고, 기존의 방법과 동일하게 간극수압 측정용 관을 매설하였다. 배수재 또한 기존의 방법과 동일한 것을 사용하였고, 하루 정도의 포화단계를 거쳐 기존의 방법과 동일한 지반조성을 위해 예비압밀을 실시 하였으며, 상세방법은 다

음과 같다.

- ① 예비압밀 종료 후 타설용 장치를 연결하고 유압재하 장치를 이용해 Mandel을 관입시킨다.
- ② 관입이 완료된 후 배수재를 바닥판의 클램프에 고정하고 멘드렐을 인발함으로써 배수재 타설을 완료한다.
- ③ 기존의 방법과 동일한 단계별 하중을 가하면서 동일한 시간에 대하여 통수능을 측정한다.

4. 수치해석 조건

4.1 표준압밀 실험

시료의 모델은 연약점토 모델인 Cam-clay model을 사용하였다. 수치해석에 사용된 시료의 조건은 표 4.2와 같이 초기 함수비는 90%, 비중은 2.6, 초기 간극비는 2.236이고 포화단위중량은 14.478 kN/m^3 이다. 그리고 압축지수 C_c 는 0.663과, 팽창지수 C_s 는 0.1105로 압축지수의 1/6에 해당하는 값을 입력하였고, 투수계수는 $1.49 \times 10^{-4} \text{ m/day}$ 이며 이 조건들은 아래 표 4.2에 정리하였다.

표 4.1 표준압밀 수치해석 입력조건

구성모델	$\gamma_{sat} (\text{kN/m}^3)$	$k_x = k_y (\text{m/day})$	e_0	C_c	C_s
Cam-clay	14.478	1.49×10^{-4}	2.236	0.663	0.1105

압밀하중은 5kpa, 10kpa, 20kpa, 40kpa, 80kpa, 160kpa, 320kpa, 640kpa까지 순서대로 재하한 후 다시 320kpa부터 5kpa까지 재하 하였으며, 각 단계별 압밀시간은 1일을 적용하였다.

4.2 통수능 실험

시료의 간극비는 앞의 표준압밀 실험과 동일하게 액성한계의 2배 함수비에 맞춘 통수능 실험조건과 동일하도록 초기 함수비는 $w_0 = 120\% (= 2 \cdot LL)$ 이고 $e_0 = 2.236$ 로 입력하였고, 압축지수 C_c 는 0.663, 팽창지수 C_s 는 압축지수 C_c 의 1/10에 해당하는 0.0663을 적용하였다. 또한, 수평 투수계수는 재성형 점토시료를 대상으로 한 조건을 모델링하는 것이므로 완전 교란된 경우 연직투수계수와 수평투수계수의 비가 1에 가까워지므로 $k_v = k_h$ 로 가정하였다. 배수재는 강성을 무시하고, 지반과 같은 거동을 유도하기 위하여 투수계수와 관련된 입력값 외에는 시료의 입력 값과 동일하게 적용하였다. 강성 재하판은 자중을 무시하여 등분포하중 만으로 상재하중이 가해질 수 있도록 하였으며, 높은 강성을 모사하기 위해 탄성계수를 $1 \times 10^{10} \text{ kpa}$ 로 적용하였다. 높은 탄성계수를 적용한 재하판에 의하여 통수능 실험과 동일하게 상재하중 작용시 등변형조건으로 침하되도록 유도하였다. 강성 재하판 가운데 배수재와 연결되는 관은 완전 배수조건으로 하였고, 그 외 강성 재하판 외각부분들은 비배수 조건으로 하여 배수재를 통해서만 간극수가 소산되도록 실험과 동일한 조건으로 모델링하였다. 이와 같은 입력조건 내용들을 아래의 표 4.3, 4.4에 나타내었다.

표 4.2 배수재의 수치해석 입력조건

구성모델	$\gamma_{sat} (\text{kN/m}^3)$	$k_x = k_y (\text{m/day})$	e_0	C_c	C_s
Cam-clay	14.478	3.37	2.236	0.663	0.0663

표 4.3 강성 재하판의 수치해석 입력조건

구분	구성모델	$\gamma_{sat} (kN/m^3)$	배수조건	E(kpa)	ν
강성 재하판 중심의 배수재 연결관	Linear elastic	0	완전배수	1×10^{10}	0
강성 재하판 외곽	Linear elastic	0	비배수	1×10^{10}	0

통수능 실험의 하중단계는 초기응력에 대한 적용 후 실험단계와 동일하도록 상재하중을 50kpa씩 증가시키며 4단계로 200kpa까지 적용하였다. 그리고 각 단계마다 3일의 시간을 적용하여 실험조건과 동일하게 적용시켜 해석하였다.

4.3 스미어존에 대한 조건

앞에서 언급한 대로 연약지반의 압밀특성에 관한 연구 보고서(1999)에 의하면 $k_s/k_h = 0.6 \sim 0.86$ 이라고 되어있다. 그러므로 투수계수 $k_h = 1.28 \times 10^{-4}$, $k_v = 1.49 \times 10^{-4}$ 을 적용하였고, 압축지수 C_c 는 0.663, 팽창지수 C_s 는 압축지수의 1/10에 해당하는 0.0663을 적용하였다. 또한, 아직까지 스미어존의 범위가 정확하게 어디까지라고 제안한 결과는 미비한 실정인으로서, 다만 경험적으로 멘드렐 직경의 2~3배 정도로 가정하여 설계하는 것이 일반적이라고 한다. 따라서 본 논문의 스미어존은 멘드렐 직경의 2배를 적용하였다.

5. 수치해석 결과

5.1 표준압밀 실험 결과

표준압밀 실험에 대한 수치해석 결과로부터 간극비와 유효응력과의 관계를 그림 5.2에 실험결과와 함께 나타내었다.

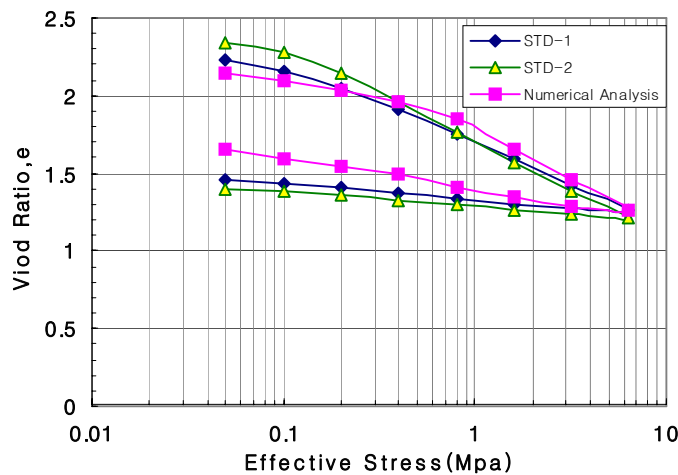


그림 5.2 표준압밀 수치해석의 간극비-유효응력

그림 5.2와 같이 실험결과와 수치해석과의 관계가 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러므로 수치해석에 적용된 입력 조건들이 압밀 거동에 대하여 비교적 잘 분석되어진 것으로 판단된다.

5.2 통수능 실험 결과

그림 5.3은 배수재를 타설한 모형지반의 통수능 시험과 수치해석을 통하여 얻은 시간 - 압밀 침하 특성을 나타내고 있다. CASE 1의 경우 멘드렐을 이용하여 배수재를 타설한 다음 통수능 시험을 수행한 결과이며, CASE 2의 경우 기존의 복합 통수능 시험방법에 의한 시험 결과이고, Numerical analysis 1은 스미어존을 고려하지 않고 수치해석을 통한 시험 결과이며, Numerical analysis 2는 스미어존을 고려하여 수치해석을 통한 시험 결과를 나타낸 것이다.

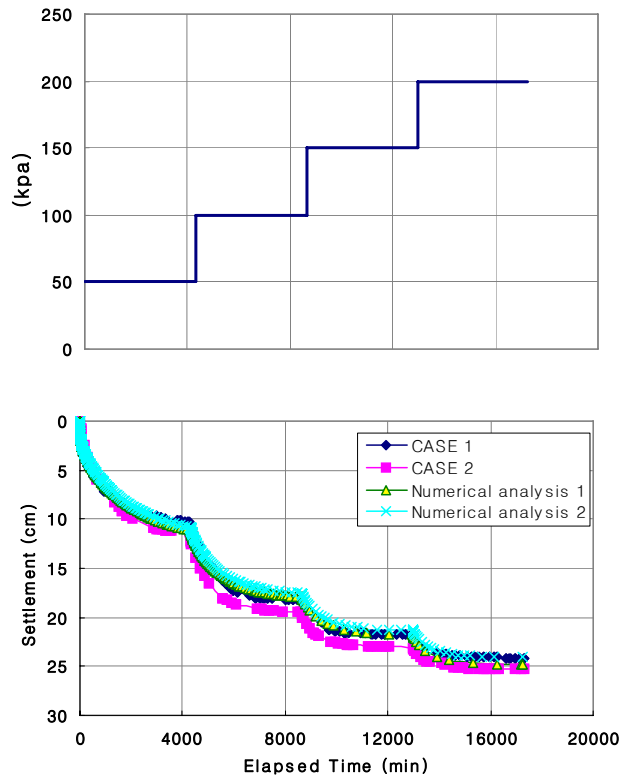


그림 5.3 시간-압밀 침하량 곡선

그림에서와 같이 4단계에 걸쳐 압밀하중을 재하하는 과정에서 발생된 압밀 침하량은 CASE 1의 경우 24.17cm, CASE 2의 경우 25.3cm로 나타났으며, Numerical analysis 1의 경우 24.75cm, Numerical analysis 2의 경우 24.01cm로 나타났다. 네 조건 모두 압밀하중이 재하되는 초기에 침하량이 급격하게 발생되며, 압밀하중 단계가 증가함에 따라 발생되는 총 침하량은 점진적으로 감소함을 알 수 있다. 한편, 선행압밀을 가한 CASE 1의 경우 교반 시료를 사용한 CASE 2에 비하여 침하량이 상대적으로 적게 발생됨을 알 수 있다. 또한, 스미어존을 고려하지 않은 Numerical analysis 1의 경우 CASE 2와 비슷한 경향을 보였으며, 스미어존을 고려한 Numerical analysis 2의 경우는 1단계에서는 CASE 2와 비슷하게 CASE 1보다 초기 침하량이 많은 경향으로 나타났지만 시간이 지남에 따라 CASE 1과 비슷한 경향을 보이고 있다.

그리고 시험 방법에 따라 발생된 단계별 최종 침하량은 표 5.1에서와 같이 2단계에서 실험한 침하량과 수치해석의 침하량이 약 1.3cm 정도의 차이가 발생되었으며, 나머지 단계별 최종 침하량의 크기는 유사하게 나타남을 알 수 있다.

표 5.1 단계별 최종 압밀 침하량

σ'_c (kpa)	50	100	150	200
Test NO.				
CASE 1 (cm)	10.3	8.0	3.5	2.37
CASE 2 (cm)	11.35	8.07	3.63	2.25
Numerical analysis 1	11.26	6.73	3.85	2.91
Numerical analysis 2	10.92	6.65	3.79	2.65

6. 스미어존의 매개변수 적용성

6.1 배수재의 투수계수 변화에 따른 압밀침하 특성

그림 6.1은 배수재의 투수계수 변화에 따른 시간-침하량 비교 곡선이다. 그림에서와 같이 투수계수는 0.337 ~ 3370m/day는 비슷한 형태의 곡선을 보이는 반면에 0.000337 ~ 0.0337m/day를 보면 각 하중단계별 압밀 침하량이 수렴을 하지 않은 상태에서 다음 단계로 계속 침하가 발생하는 경향을 볼 수 있다. 이것은 투수계수가 낮기 때문에 압밀 지연으로 인하여 각 하중단계별 압밀 소요시간이 더 필요하다는 것을 알 수 있다. 그리고 최종 침하량을 봤을 때, 10.3cm, 17.7cm 정도로 배수재의 투수성이 낮다는 것을 한눈에 알아볼 수 있다.

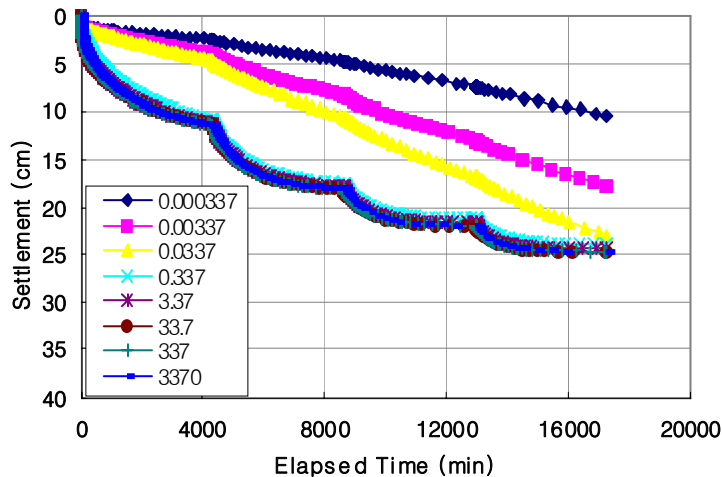


그림 6.1 배수재의 투수계수 변화에 따른 시간-압밀 침하량 곡선

6.2 스미어존의 범위에 따른 압밀침하 특성

그림 6.2는 스미어존의 범위에 따른 시간-침하량 비교 곡선이다. 보통 스미어존의 범위는 제안자들에 따라 조금씩 다르지만 배수재 직경의 2~3배로 보는 경향이 많다. 따라서 본 장에서는 스미어존을 배수재 직경의 2~4배를 적용하여 그 적정성에 대해 분석해 보았다.

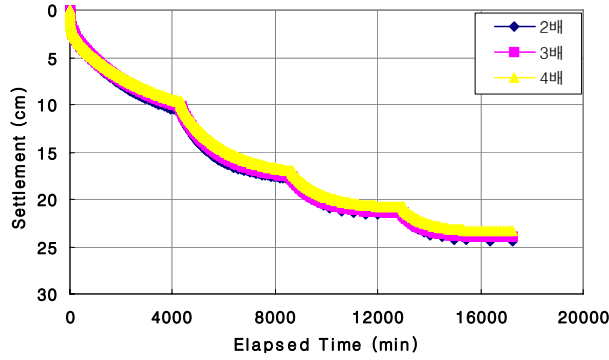


그림 6.2 스미어존의 범위에 따른 시간-압밀 침하량 곡선

그림 6.2를 보면 시간에 따라서 스미어존의 범위가 클수록 압밀은 지연되는 것을 볼 수 있다.

6.3 스미어존의 투수계수 변화에 따른 압밀침하 특성

앞의 2.2.2절에서 설명하였듯이 박(1994)은 $k_s/k_h = 0.55$ 라 하였고, 해안매립과 연약지반개량을 위한 신기술 개발 보고서(1996)에서는 $k_s/k_h = 0.5$ 라 하였으며, 연약지반의 압밀특성에 관한 연구 보고서(1999)에서는 $k_s/k_h = 0.6 \sim 0.86$ 이라고 제안하였다. 그리하여 본 장에서는 $k_s/k_h = 0.5 \sim 0.8$ 을 적용하여 분석해보았고 $k_s/k_h = 1 \sim 2$ 를 추가로 적용시켜보았다.

그림 6.4는 스미어존의 투수계수 변화에 따른 시간-침하 비교 곡선이다. 아래 그림 6.4와 같이 k_s/k_h 의 비가 클수록 시간에 따른 침하는 빠르게 나타나는 것을 볼 수 있다.

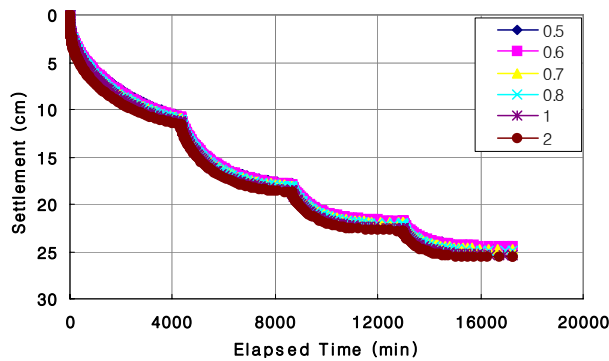


그림 6.4 스미어존의 투수계수 변화에 따른 시간-압밀 침하 곡선

7. 결론

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

- 1) 표준압밀 실험 결과를 Cam-clay 모델을 사용한 수치해석과 비교 분석한 결과, 유사한 침하 경향을 나타내어 입력정수와 모델의 적정성을 확인할 수 있었다.
- 2) 관입식 통수능 실험 결과를 Cam-clay 모델을 사용하여 수치해석을 실시한 결과, 매우 근접한 침하

경향에 대한 분석 결과를 얻을 수 있었다.

- 3) 스미어존을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 수치해석 결과, 스미어존을 고려했을 때 압밀 지연이 발생하는 것을 알 수 있었다.
- 4) 스미어존을 고려한 배수재의 투수계수에 따른 변화를 수치해석한 결과, 배수재의 투수계수가 감소할수록 압밀도가 지연되는 경향을 나타내었으나 배수재의 투수계수가 증가하여도 비슷한 경향을 보이는 것은 배수재의 투수성에 비해 시료의 투수성이 낮은 결과로 판단된다.
- 5) 스미어존의 직경비가 증가할수록 압밀도는 감소하고, 제시된 이론식에 대한 스미어존의 직경비가 적정함을 확인할 수 있었다.
- 6) 스미어존의 투수계수 증가비(k_s/k_h)가 증가할수록 압밀도는 증가한다는 것을 확인하였으며, 기 제안된 스미어존의 투수계수 제안식 $k_s/k_h = 0.5 \sim 0.86$ 은 타당한 것으로 판단되고, 본 연구 결과의 제안된 범위 $k_s/k_h = 0.5 \sim 1$ 도 적정한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김동건(2007), “관입식 통수능 시험기의 개발과 적용”, 강원대학교 석사학위논문.
2. 박영목(1994), “현장조건을 고려한 플라스틱 보드 드레인의 성능평가”, Geosynthetics Conference, pp.91~100.
3. Akagi, T.(1977), "Effect of Displacement Type Sand Drains on Strength and Compressibility of Soft Caly", *Dr. Engrg. Dissert.*, Univ. of Tokyo.
4. Bergado, D. T., et.al.(1991), "Smear Effects Vertical Drains on Soft Bangkok Clay", *ASCE*, Vol.117, No.10, pp.1509~1530.
5. De Mello, V. F. B.(1969), "Foundation of Building on clay", *A state of the Art Report, Proc. of 7th ICSMFE*, Mexico City, pp.49~136.
6. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains" *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Stockholm, Sweden Vol3, pp.677~682.
7. Hansbo, S.(1987), "Fact and Fiction in the Feild of Vertical Drainage", *Prediction and performance in Geotechnical Engineering*, Calgary, pp. 61~72.
8. Holtz, R. D. and Holm, G.(1973), "Excavation and sampling around some drains at Ska-Edeby, Sweden", *Proc. Nordic. Geot. Meeting, Trondheim, Norwegian Geotechnical Institute*, Oslo.
9. Jamiolkowski, M. and Lancellotta, R.(1981), "Consolidation by Vertical Drains-Uncertainties involved in Prediction of Settle Rates", *Panel Discussion, Proc. 10th, International Conference on Soil Machanics and Foundation Engineering*, Stockholm.
10. Park, Y. M. and Miura, N.(1998), "Soft Ground Improvement Using Prefabricted Vertical Drains(PVD)", In: Miura, N., Bergado, D(Eds), *Improvement of Soft Ground, Design, Analysis, and Current Researches*, pp.35~48.
11. Rixner, J. J., Kremer, S. R. and Smith, A. D.(1986), "Prefabricated Vertical Drains", FHWA/RD-86/168, *Federal highway administration*, Washington, D.C., Vol. 1.