

준설매립지반의 자중압밀을 고려한 2차원 축대칭 비선형 유한변형 압밀 수치해석 모델 개발

Development of a numerical model for 2-D axisymmetric non-linear finite strain consolidation considering self-weight consolidation of dredged soil-

곽태훈¹⁾, Kwak, Taehoon, 윤상봉²⁾, Yoon, Sangbong, 안용훈³⁾, An, Yonghoon, 최은석⁴⁾, Choi, Eunseok, 최항석⁵⁾, Choi, Hangseok

- ¹⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정, Graduate student, School of Civil, Environ & Architect. Engineering, Korea University
- ²⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정, Graduate student, School of Civil, Environ & Architect. Engineering, Korea University
- ³⁾ (주)건화, 사원, Kunhwa Consulting & Engineering Co., Ltd.
- ⁴⁾ (주)에스디이엔지, 이사, SD Eng.
- ⁵⁾ 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Environ & Architect. Engineering, Korea University (교신저자)

SYNOPSIS : Vertical drains have been commonly used to increase the rate of the consolidation of dredged material. The installation of vertical drains additionally provides a radial flow path in the dredged foundation. The objective of this study develops a numerical model for 2-D axisymmetric non-linear finite strain consolidation considering self-weight consolidation to predict the effect of vertical drain in dredged foundation which is in process of self-weight consolidation. The non-linear relationship between the void ratio and effective stress and permeability during consolidation are taken into account in the numerical model. The results of the numerical analysis are compared with that of the self-weight consolidation test in which an artificial vertical drain is installed. In addition, the numerical model developed in this paper is the simplified analytical method proposed by Ahn et, al (2010). The comparisons show that the developed numerical model can properly simulate the consolidation of the dredged material with the vertical drains installed.

Keywords : dredged soil, numerical analysis, vertical drain, non-linear finite strain consolidation

1. 서 론

1923년 Terzaghi는 압밀시 미소변형이며, 압밀이 진행되는 동안 투수계수가 일정하고 응력-변형률의 관계가 선형이라고 가정한 일차원 압밀이론을 제시하였다. 이는 준설매립지반과 같은 초연약지반의 거

동특성인 응력-변형률관계의 비선형성과 압밀이 진행되는 동안 투수계수의 감소를 고려하지 못한다. Gibson 등(1967)은 Terzaghi이론을 보완한 비선형 유한변형 압밀이론을 제시하였다. 편미분 방정식인 Gibson 등(1967)의 비선형 유한변형 압밀식은 이론해를 구하기 어렵기 때문에 Cargill(1982)은 수치해석을 위한 유한차분식을 제시하였으며, Stark 등(2005)은 준설매립지반 수치해석 프로그램인 PSDDF(Primary Consolidation Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill)을 개발하였다. PSDDF는 연직배수재를 고려하지 않는 1차원 준설매립지반의 압밀거동 해석에 주로 사용된다. 한편, 준설매립지반에서는 압밀에 소요되는 시간을 단축시키기 위해 선행압밀공법과 함께 연직배수공법을 적용한다. 연직배수재를 준설매립지반에 타설하면 방사방향 압밀이 추가적으로 발생하고 전체 압밀 소요시간이 단축된다. 보통 준설매립지반의 자중압밀 완료는 매립지반의 두께에 따라 몇 년이 소요될 수 있기 때문에, 일반적으로 연직배수재는 준설매립토의 자중압밀이 완료되기 전에 시공한다.

현재까지 연직배수재에 관한 해석적 연구는 주로 자중압밀이 완료된 준설매립지반에 대한 미소변형이나 비선형 유한변형 압밀해석에 국한되었다. 본 연구에서는 준설매립지반에서 연직방향으로 자중압밀이 진행되는 도중 연직배수재 타설에 의해 방사방향의 흐름이 추가로 발생하는 경우의 압밀거동 예측을 위하여 자중압밀을 고려한 2차원 축대칭 비선형 압밀해석 수치모델을 제안하였다. 개발된 수치해석 모델은 연직배수재가 설치된 준설매립지반의 압밀과정동안 간극비의 변화에 따른 지반의 압축성과 투수계수의 비선형성, 준설토 자중을 해석에 고려할 수 있다. 수치해석 모델은 2차원 축대칭으로 토괴의 자중압밀을 포함하여 지배방정식을 유도하였고, 유한차분해석기법을 적용하였다. 개발된 수치해석 모델의 검증을 위해 기존의 실내시험 결과와 Carillo(1942)가 제안한 식을 사용하여 해석한 결과와 비교분석 하였다. Carillo(1942)식의 연직방향 비선형 유한변형 압밀 해석은 Morris(2002)의 이론해와 PSDDF의 해석결과를 이용하였고, 방사방향 해석은 Barron(1948)이 제시한 이론해를 적용하였다(안용훈 등, 2010).

2. 자중압밀을 고려한 2차원 축대칭 비선형 유한변형 압밀해석

2.1 지배 방정식 유도

연직배수재는 일반적으로 삼각형이나 사각형의 격자형태로 타설되며, 하나의 연직배수재가 미치는 영역을 원기둥모양의 포화된 지반이라 가정하면, 압밀도중 지반의 임의의 지점에 대한 토체의 체적관계는 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

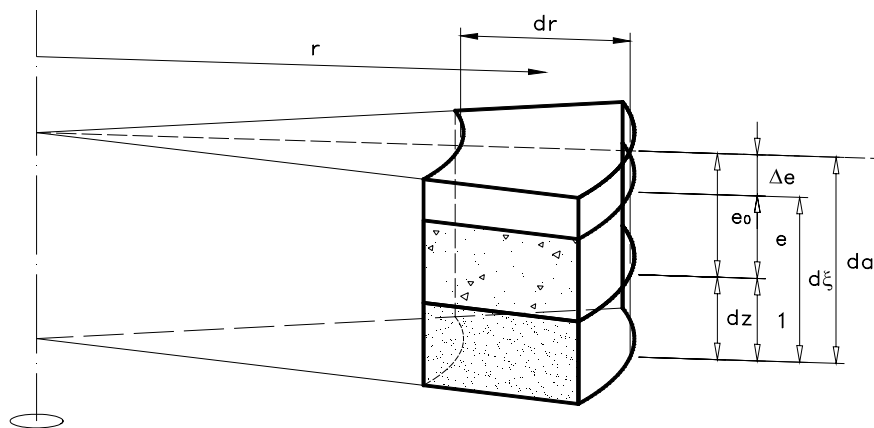


그림 1. 압밀시 연직배수재를 타설한 준설매립지반에서 압밀 발생시 토체 체적관계

Gibson 등(1967)은 물질좌표계(material coordinate)를 제시하여 각 좌표계와 간극비 사이의 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$d\xi = \frac{\partial \xi}{\partial z} dz = (1+e)dz \quad (1)$$

$$d\xi = \frac{\partial \xi}{\partial a} da = \frac{1+e}{1+e_0} da \quad (2)$$

한편, 원통형 좌표계의 θ 방향의 흐름과 변화가 없는 축대칭 조건을 가정하면 미소시간 dt 동안의 유입 유량과 유출 유량의 차이는 다음과 같다.

$$q_{net} = \frac{\partial q_v}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial q_r}{\partial r} dr \quad (3)$$

여기서, q_v 는 연직방향의 유량, q_r 은 방사방향의 유량이다. Darcy's 법칙에 따르면 위 식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{net} = -\frac{\partial}{\partial \xi} \left(k_v \frac{\partial h}{\partial \xi} \right) r dr d\theta d\xi - \frac{\partial}{\partial r} \left(k_h r \frac{\partial h}{\partial \xi} \right) dr d\theta d\xi \quad (4)$$

위 식에서 h 는 전수두, k_v 와 k_h 는 각각 연직방향 수평방향 투수계수이며 이 투수계수는 간극비(e)의 함수이다. 임의의 시간 토체 내에 존재하는 유체의 체적은 다음과 같다.

$$V_w = \frac{e}{1+e} d\xi d\theta r dr \quad (5)$$

위 식을 시간 t 에 대해 미분하여 정리하면 시간에 따른 토체 내 유체의 체적변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = -\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} r dr d\theta d\xi \quad (6)$$

연속성의 법칙이 성립하기 위해서는 식 (4)와 식 (6)이 같아야 하므로

$$\begin{aligned} -\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} r dr d\theta d\xi &= -\frac{\partial}{\partial \xi} \left(k_v \frac{\partial h}{\partial \xi} \right) r dr d\theta d\xi \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial r} \left(k_h r \frac{\partial h}{\partial \xi} \right) dr d\theta d\xi \end{aligned} \quad (7)$$

위 식을 간단히 하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k_v \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{\gamma_w r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_h r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (8)$$

여기서, γ_w 는 물의 단위중량을 의미한다. 한편, 토체의 평형관계에 대해 식을 세운 후, 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \xi} + \frac{e\gamma_w + \gamma_s}{1+e} = 0 \quad (9)$$

여기서, γ_s 는 흙 입자의 단위중량이다. 위 식에서 σ 는 전응력을 의미한다. 한편, 과잉간극수압(u)은 전응력 σ 와 유효응력 σ' , 정수압 u_0 를 사용하여 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$u = \sigma - \sigma' - u_0 \quad (10)$$

식(8)에 식(9)과 식(10)을 대입하여 정리하면

$$\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[k_v \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} + \frac{\partial \sigma'}{\partial \xi} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_h \frac{\partial \sigma'}{\partial r} r \right) = 0 \quad (11)$$

좌표관계와 chain rule을 적용하면 식 (11)은 다음 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left(\frac{k_v}{1+e} \right) \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k_v}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial z} \right] \\ & + \frac{1+e}{\gamma_w} \left[\frac{\partial k_h}{\partial r} \frac{\partial \sigma'}{\partial r} + k_h \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \sigma'}{\partial r} + \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial r^2} \right) \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)는 준설패립지반의 자중을 고려한 2차원 축대칭 비선형 유한변형 압밀거동의 지배방정식이 된다. 지배방정식을 수치해석을 위한 유한차분식으로 나타내기 위하여 그림 2와 같은 해석격자를 사용하고 유한차분식을 단순화 하기위해 아래와 같은 계수를 도입하였다.

$$\begin{aligned} \alpha(e) &= \frac{k_v(e)}{1+e} \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \\ \beta(e) &= \frac{d}{de} \left(\frac{k_v(e)}{1+e} \right) \\ \lambda(e) &= (1+e) \frac{\partial k_h(e)}{\partial e} \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \\ \mu(e) &= (1+e) k_h(e) \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \\ \theta(e) &= (1+e) k_h(e) \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial e^2} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (12)를 유한차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$e_{i,j}^{t+1} = e_{i,j}^t - \frac{\Delta t}{\gamma_w} [A + B]$$

$$A = \left(\gamma_c \beta(e) + \frac{\alpha(e_{i+1,j}) - \alpha(e_{i-1,j})}{2\Delta z} \right) \times \frac{e_{i+1,j} - e_{i-1,j}}{2\Delta z} + \alpha(e) \times \frac{e_{i+1,j} - 2e_{i,j} + e_{i-1,j}}{\Delta z^2}$$

$$B = (\lambda(e) + \theta(e)) \times \left(\frac{e_{i,j+1} - e_{i,j-1}}{2\Delta r} \right)^2 + \frac{\mu(e)}{r_{i,j}} \times \left(\frac{e_{i,j+1} - e_{i,j-1}}{2\Delta r} \right) + \mu(e) \times \left(\frac{e_{i,j+1} - 2e_{i,j} + e_{i,j-1}}{\Delta r^2} \right) \quad (14)$$

여기서, 아래첨자 i, j 는 각각 방사방향과 연직방향의 절점번호이고 위첨자 t 는 시간을 나타낸다. 식 (14)는 임의의 시간 t 단계의 간극비를 사용하여 $t+1$ 단계의 간극비를 계산하는 explicit방식을 사용한다.

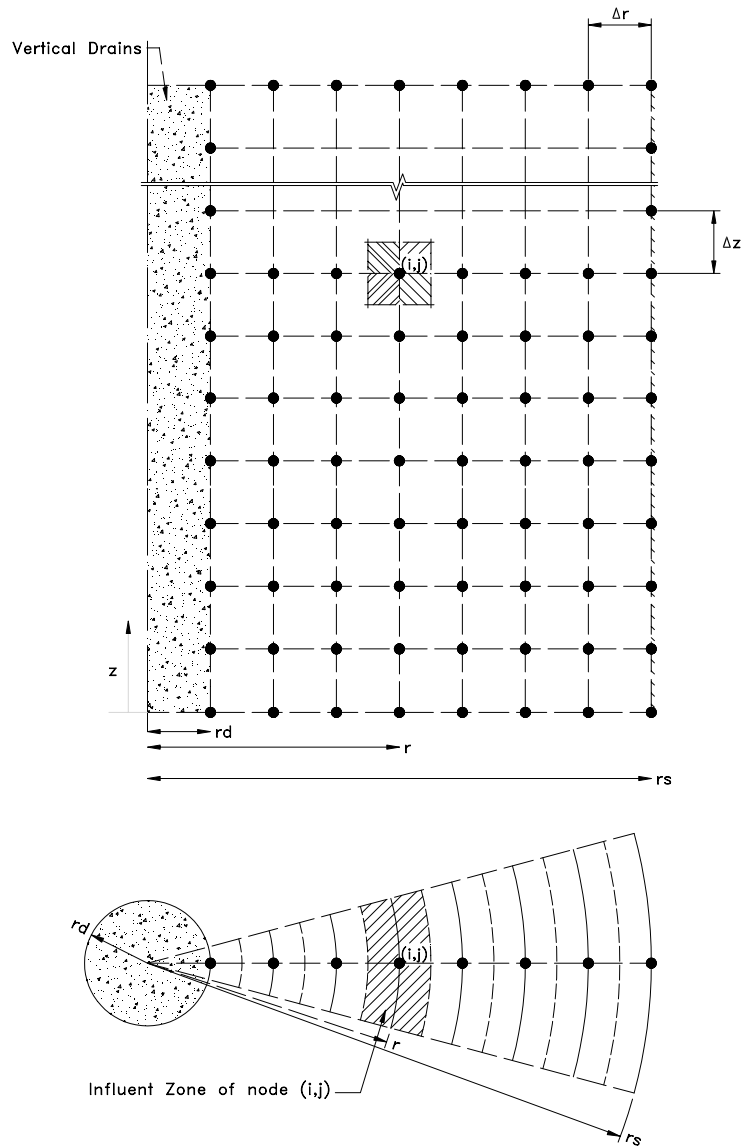


그림 2 연직배수제가 타설된 준설패립지반의 2차원 축대칭 유한차분 해석 격자

2.2 모델의 경계조건

연직배수재가 타설된 준설매립지반을 모사하기 위해 준설매립지반 배수 경계조건과 비배수 경계조건
의 2가지 경계조건을 적용하였다. 준설매립지반의 상부는 배수경계조건이며 재하응력이 없을 때에는 준
설토의 초기간극비가 유지된다. 그림 2에서 $r = rd$ 인 연직배수재와 준설매립지반 사이는 배수 경계조건
을 사용하여 타설하는 즉시 과잉간극수압(u)이 0이 되어 압밀이 완료되도록 하였다.

그림 2에서 준설매립지반 하부($z = 0$)의 경계조건은 일면 및 양면배수 조건에 따라 비배수 또는 배수
경계조건을 적용하였다. 양면배수조건을 적용할 경우에는 준설토를 투기하는 시점에 하부 경계면에서
과잉간극수압이 0이 되어 최종압밀에 도달하도록 하였다. 일면배수 경우는 하부 경계면을 불투수 경계
조건(no flux boundary)으로 해석하였다. Darcy's 법칙을 적용하면 하부 경계면의 연직방향 위아래 절
점의 관계는 다음과 같다.

$$e_{i-1,j} = e_{i+1,j} + 2\Delta z(\gamma_s - \gamma_w) \times \frac{\partial e}{\partial \sigma'} \quad (15)$$

$z = 0$ 인 지점에서 $e_{i-1,j}$ 는 존재하지 않으므로 아랫방향으로 Δz 만큼의 거리를 가지는 가상 절점을 만
들어 해석을 수행한다. 그림 2에서 $r = rs$ 인 지점은 불투수 경계조건(no flux boundary)을 사용하여 해
석하였다. $z = 0$ 인 경우의 해석과 마찬가지로 방사방향으로 Δr 의 거리를 가지는 가상 절점을 생성하여
해석을 수행하며, 불투수 경계일 경우 $r = rs$ 에서 수평방향의 흐름은 발생하지 않으므로 다음과 같이 나
타낼 수 있다.

$$e_{i,j+1} = e_{i,j-1} \quad (16)$$

식 (16)을 사용하여 경계면 해석에 필요한 각 절점에서의 간극비를 계산한다.

3. 해석프로그램 검증

본 연구에서 개발된 수치해석 프로그램을 검증하기 위하여 우선, 기존의 연직방향 비선형 자중압밀
해석프로그램인 PSDDF의 결과와 비교하였다. 그리고 연직 및 방사방향의 흐름이 동시에 발생하는 조건
에 대한 검증을 위해 안용훈 등(2010)의 실험결과 및 간편 이론해와 비교분석 하였다.

안용훈 등(2010)이 준설토를 모사하기 위해 실내시험에 사용한 시료는 카올리나이트 이며, 기본 물성
치는 표 1과 같다. PSDDF의 입력값과 본 논문에서 개발된 프로그램의 입력값은 침강 및 자중압밀,
CRS실험으로 구한 카올리나이트 시료의 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 결과이며 그림 3과 4에 도
시하였다. 실내시험은 균질한 카올리나이트 시료로 시행되어 층상구조가 없으므로 연직방향과 방사방향
의 투수계수는 같다고 가정하고 수치해석을 수행하였다.

표 1. 카올리나이트 시료의 기본 물성치 (안용훈 등, 2010)

시료	비중(G_s)	액성한계(LL, %)	소성한계(PL, %)	소성지수(PI, %)	흙의 분류
카올리 나이트	2.65	61.2	30.4	30.8	CH

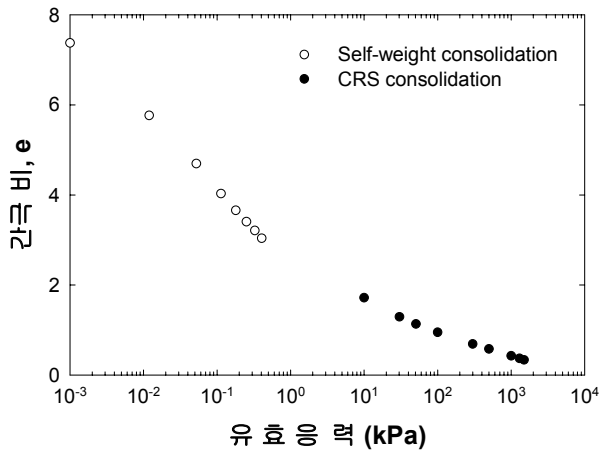


그림 3 간극비-유효응력 관계 (자중압밀 및 CRS압밀 시험결과)

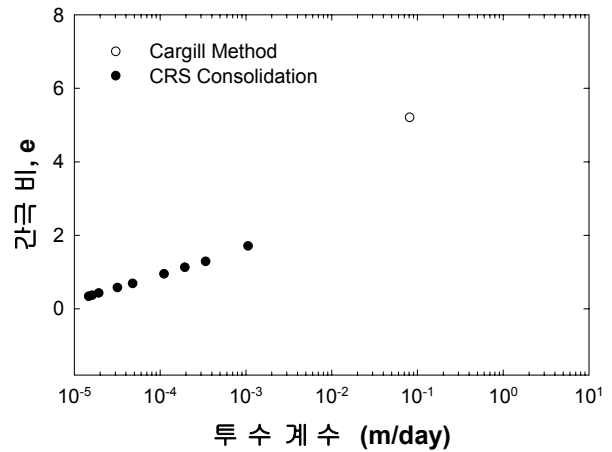


그림 4 간극비-투수계수 관계 (자중압밀 및 CRS압밀 시험결과)

3.1 1차원 자중압밀 해석 결과와 비교

1차원 자중압밀 해석 결과와 본 연구에서 개발한 수치해석 프로그램의 결과를 비교하기 위하여 그림 2에서 연직배수재와 준설지반의 경계면인 $r = r_d$ 지점의 경계조건을 불투수 경계조건으로 해석하였다. 이때 $r = r_s$ 인 경우의 해석과 같이 방사방향으로 Δr 만큼 떨어진 가상 절점을 생성하여 해석하였고, 가상 절점에서 간극비는 식 (16)을 사용하여 계산하였다. 초기 높이가 100cm로 수행된 자중압밀시험 조건을 모사하기 위해 수치해석에서도 동일한 초기 시료높이(100cm)에 대한 일면 및 양면 배수 조건으로 해석을 수행하였으며, 초기간극비는 7.38을 사용하였다(안용훈 등, 2010). PSDDF 해석결과와 본 연구에서 개발한 수치해석 프로그램(1차원 조건에 대하여 해석) 해석결과를 시간에 따른 계면고의 변화로 그림 5와 그림 6와 같이 비교하여 나타냈다.

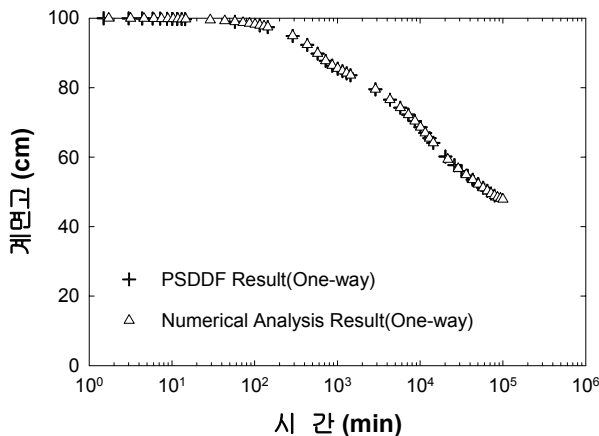


그림 5. PSDDF해석결과와 수치해석결과 비교 (하부 일면배수)

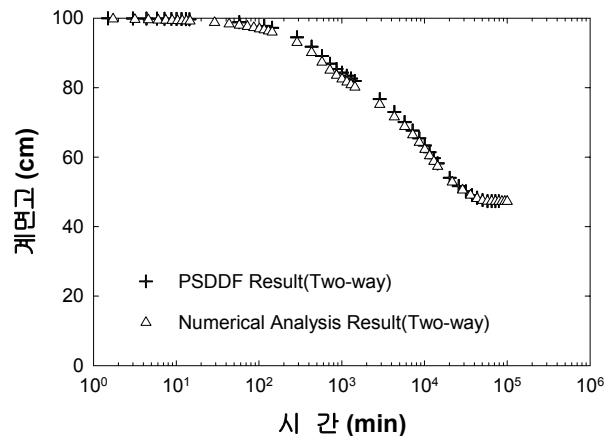


그림 6. PSDDF해석결과와 수치해석결과 비교 (하부 양면배수)

위 조건에서 PSDDF의 해석결과와 개발된 프로그램의 해석결과가 일면배수일 경우는 일치하는 반면 양면배수일 경우 본 연구에서 제안한 수치해석 프로그램을 통한 해석결과가 PSDDF의 해석결과보다 미

소하게 빨리 압밀이 진행되었다. 그 이유는 PSDDF에서 양면배수일 경우 하부 경계면에서의 간극비 계산에 하부지반의 투수계수와 준설매립지반의 투수계수의 차이를 고려하는 반면, 제안한 프로그램 경우 하부 경계면에서 준설토 투기 즉시 과잉간극수압이 0이 되어 하부경계면의 간극비가 최종간극비로 도달한다고 가정하였기 때문인 것으로 보인다.

3.2 안용훈 등(2010)의 실험결과 및 간편 이론해와 비교

안용훈 등(2010)이 수행한 연직배수재가 타설된 100cm 높이의 대형자중압밀 시험 결과와 본 논문에서 제안한 해석프로그램의 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 대형자중압밀 시험장비는 배수와 비배수를 조절할수 있는 하부판이 있어 하부 배수 시, 양면배수 조건을, 하부 비배수 시, 일면배수 조건을 모사할 수 있다. 또한, 대형자중압밀시험 장비를 구성하는 다수의 지름 30cm, 높이 20cm의 투명 아크릴에는 고무링이 셀과 셀 사이에 장치되어 자중압밀이 진행되는 동안 아크릴 셀 사이에서 발생할 수 점토 슬러리 유출을 방지하며 계면고의 확인이 가능하다. 시험장치 중심에는 연직배수재 역할을 하는 원통형 아크릴을 고정할수 있는 고정장치가 존재하며 연직배수재 역할을 하는 원통형 아크릴의 지름은 6cm이다(안용훈 등, 2010).

본 연구에서 개발된 프로그램의 해석 격자망은 그림 2와 같으며 실험장비의 제원을 고려하여 $r_d = 3\text{cm}$, $r_s = 15\text{cm}$, $h = 100\text{cm}$ 로 해석을 수행하였다. 양면배수조건일 때 수치해석과 실내실험 결과는 비교적 일치했으나, 일면배수일 경우의 종반부에 다소 차이를 보인다. 이는 실내시험의 경우 시료와 시험장비 벽면에서의 마찰력, 부등침하로 인한 점토의 비 균질성 등의 요인으로 인해 압밀속도가 감소한 것으로 유추할 수 있다.

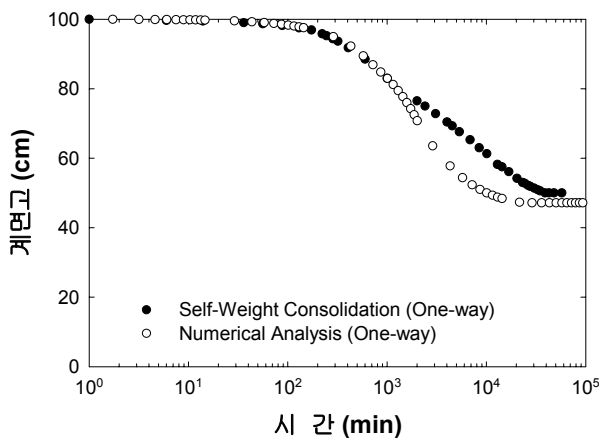


그림 7. 자중압밀 실험결과와 수치해석 결과비교 (연직배수재 포함, 하부 일면배수)

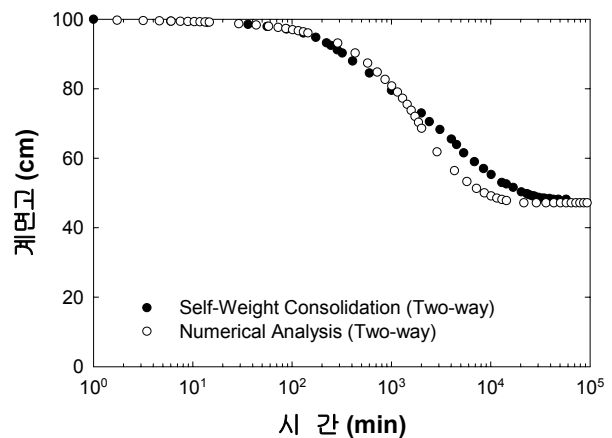


그림 8. 자중압밀 실험결과와 수치해석 결과비교 (연직배수재 포함, 하부 양면배수)

본 연구에서 개발한 수치해석 프로그램의 해석결과를 Carillo의 이론해를 근간으로 안용훈 등(2010)이 제시한 간편 이론해로 구한 해석결과와 비교 하였다. 여기서, 연직방향의 자중압밀 거동은 Morris(2002)가 제안한 식과 PSDDF해석결과를 각각 사용하였고, 방사방향 해석은 Barron(1948)이 제시한 이론해를 적용하였다. 그림 9와 그림 10은 연직방향 해석에 Morris(2002)가 제안한 식을 적용한 것이며, 그림 11과 그림 12는 PSDDF해석결과를 적용한 것이다.

안용훈 등(2010)은 연직방향 압밀계수를 50%압밀도를 기준으로 상수로 단순화 시킨 Morris(2002)의 이론해보다 PSDDF 결과를 연직방향해석에 적용시킨 경우 PSDDF결과가 각 응력단계마다 비선형성을 정밀하게 고려하였기 때문에 보다 현실조건에 근접하다고 하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램의 해석

결과는 PSDDF의 결과를 적용하였을 때 비교적 유사한 거동을 보인다.

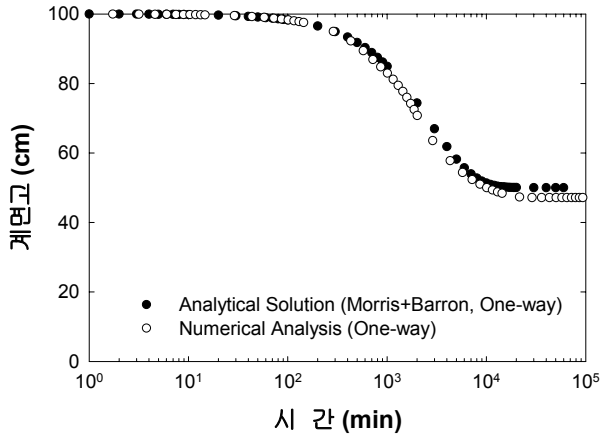


그림 9. 수치해석결과와 Morris식을 적용한 이론해 비교 (연직배수재 포함, 하부 일면배수)

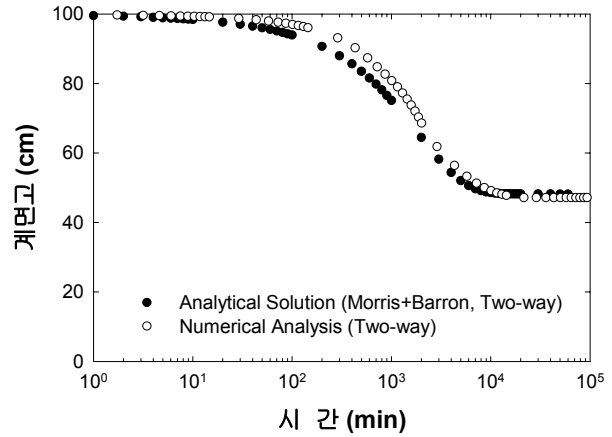


그림 10. 수치해석결과와 Morris식을 적용한 이론해 비교 (연직배수재 포함, 하부 양면배수)

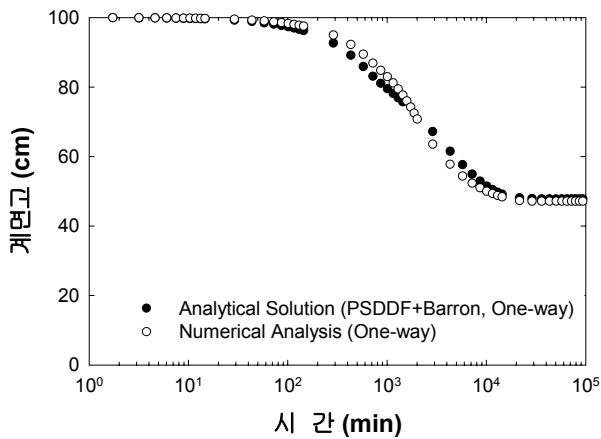


그림 11. 수치해석결과와 PSDDF결과를 적용한 이론해 비교 (연직배수재 포함, 하부 일면배수)

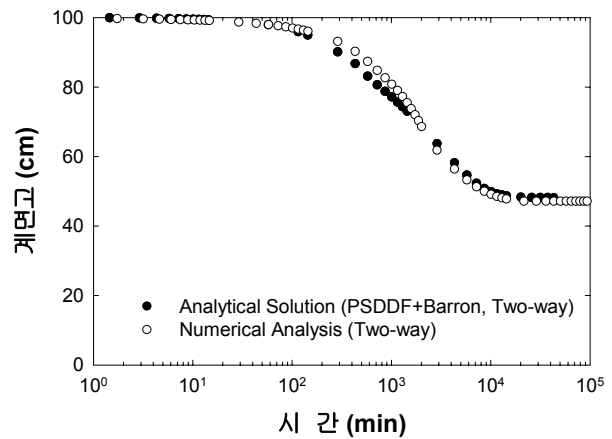


그림 12. 수치해석결과와 PSDDF결과를 적용한 이론해 비교 (연직배수재 포함, 하부 양면배수)

4. 결론

본 연구에서는 준설패립지반의 연직방향 자중압밀이 진행되는 도중, 연직배수재 타설에 의한 방사방향의 흐름이 추가로 발생하는 경우의 압밀거동을 예측할 수 있는 수치해석 프로그램을 개발하였다. 카울리나이트를 사용한 실험결과, PSDDF 해석결과, 간편 이론해와 비교를 통해 개발된 수치해석 프로그램을 검증하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 준설패립지반에서 연직배수재의 효과를 모사하기 위해서 하나의 연직배수재가 영향을 미치는 축대칭 조건에서 연속성 법칙과, Darcy's 법칙을 사용하여 연속방정식을 도출하였고, 흙의 평형조건을 고려해 지배방정식을 유도하여 흙의 자중과 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 비선형성을 효과적으로 고려하였다. 유도된 지배방정식을 통해 유한차분 해석프로그램을 개발하였다.
2. 개발된 해석프로그램을 검증하기 위해 축대칭 준설패립지반 조건을 연직배수재가 없는 일차원조건

과 유사하게 가정하여 해석한 후, 일차원 비선형 유한변형 프로그램인 PSDDF의 해석결과와 비교하였다. PSDDF의 해석결과와 해석프로그램의 결과는 일면배수일 때 일치하였고, 양면배수일 때 하부 경계면을 다루는 방식의 차이로 해석프로그램 결과의 침하가 더 빨리 발생하였다.

3. 추가 검증을 위해 카올리나이트를 이용한 실내시험 결과와 안용훈 등(2010)이 제안한 간편 이론해 해석결과와 비교분석하였다. 개발된 해석프로그램의 결과는 실내시험결과보다 침하가 더 빨랐으며, Carillo(1942)식의 연직방향 해석에 PSDDF의 해석결과를 사용한 방식과 비교적 일치하는 거동을 보인다.

5. 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 2009년 건설기술혁신사업 지원과 고려대학교 교내특별연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 안용훈, 곽태훈, 이철호, 최항석, 최은석(2010), “방사방향 배수를 고려한 초연약 지반의 비선형 유한 변형 자중압밀 거동 분석”, **한국지반공학회, 봄학술발표회**, pp.495~508.
2. Barron, R. A. (1948), “Consolidation of fine-grained soils by drain wells”, Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol.113, 718-742.
3. Cargill, K. W. (1983). "Prediction of consolidation of very soft soil." Journal of Geotechnical Engineering, 110(6).
4. Cargill, K. W. (1986), "The large strain, controlled rate of strain (LSCRS) device for consolidation testing of soft fine-grained soils", Technical Report GL-86-13, Waterways Experiment Station, Corps of Engineer, Vicksburg, MI.
5. Carillo, N. (1942), "Simple Two and Three Dimensional Caese in the Theory of Consolidation of Soils", Journal of Mathematics and Physics, Vol.21, No.1, 1-5.
6. Gibson, R. E., England, G. L., and Cargill, K. W. (1967), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. I. Finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers", Geotechnique, Vol.17, No.3, 261-273.
7. Lo, D.O.K. (1991) Soil Improvement by Vertical Drains, PhD. Dissertation, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
8. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), "Time- and stress-compressibility interrelationships", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.103, No.5, 417-430.
9. Morris, P. H. (2002), "Analytical solutions of linear finite-strain one-dimensional consolidation", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol.128, No.4, 319-326.
10. Morris, P. H. (2007). "Correlations for zero effective stress void ratio of fine-grained marine and riverine sediments." Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 133(4), 305-308.
11. Stark, T. D., Choi, H., and Schroeder, P. R. (2005a), "Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Areas, I: Theory and Use of Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill." Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 2, pp. 43-51.
12. Stark, T. D., Choi, H., Schroeder, P. R. (2005b), "Settlement of Dredged and Contaminated Material Placement Areas, II: Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill Input Parameters." Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 2, pp. 52-61.