

준설매립지반의 자중압밀을 고려한 2차원 축대칭 비선형 유한변형 압밀 모델

2-D Axisymmetric Non-linear Finite Strain Consolidation Model Considering Self-weight Consolidation of Dredged Soil

곽 태 훈¹ Kwak, Tae-Hoon

이 동 섭² Lee, Dong-Seop

임 지 희² Lim, Jee-Hee

티모시 스타크³ Stark, T. D.

최 은 석⁴ Choi, Eun-Seok

최 항 석⁵ Choi, Hang-Seok

Abstract

Vertical drains along with the preloading technique have been commonly used to enhance the consolidation rate of dredged placement formation. In practice, vertical drains are usually installed in the process of self-weight consolidation of a dredged soil deposit because this process takes considerable time to be completed, which makes conventional analytical or numerical models difficult to quantify the consolidation behavior. In this paper, we propose a governing partial differential equation and develop a numerical model for 2-D axisymmetric non-linear finite strain consolidation considering self-weight consolidation to predict the behavior of a vertical drain in the dredged placement foundation which is installed during the self-weight consolidation. In order to verify the developed model in this paper, results of the numerical analysis are compared with that of the lab-scaled self-weight consolidation test. In addition, the model verification has been carried out by comparing with the simplified method. The comparisons show that the developed model can properly simulate the consolidation of the dredged placement formation with the vertical drains installed during the self-weight consolidation. Finally, the effect of construction schedule of vertical drains and of pre-loading during the self-weight consolidation is examined by simulating an imaginary dredged material placement site with a thickness of 10 m and 20 m, respectively. This simulation infers the applicability of the proposed method in this research for designing a soil improvement in a soft dredged deposit when vertical drains and pre-loading are implemented before the self-weight consolidation ceases.

요 지

준설매립지반 설계시 압밀 소요시간 단축을 위해 연직배수공법과 선행재하공법등의 연약지반 개량공법을 주로 적용한다. 준설매립지반의 자중에 의한 압밀이 완료되기까지는 많은 시간이 소요되므로 공사비 절감, 공기단축의 이유로 연약지반 개량공법은 일반적으로 자중압밀 도중 적용된다. 본 논문에서는 준설매립지반에서 연직방향으로 자중압밀이 진행되는 도중 연직배수재 타설에 의해 방사방향의 흐름이 추가로 발생하는 경우의 압밀거동 예측을

1 비회원, (주) 동명기술공단 (DMEC Co., Ltd.)

2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate student, School of Civil, Environ & Architect. Engrg, Korea Univ.)

3 비회원, 미 일리노이대 토목환경공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Illinois, USA)

4 정회원, (주) 서신엔지니어링 상무 (Seosin Engineering Co., Ltd.)

5 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Associate professor, School of Civil, Environ & Architect. Engrg, Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3326, Fax: +82-2-928-7656, hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

위하여 자중압밀을 고려한 2차원 축대칭 비선형 유한변형 압밀 지배방정식과 이를 적용하기 위한 수치모델(Axi-Selcon)을 개발하였다. Axi-Selcon의 검증과 자중압밀 도중 연직배수재가 타설된 준설매립지반을 모사하기 위해 일련의 실내시험을 수행하였다. 이를 위해 연직배수재가 타설된 준설매립지반을 모사하는 대형자중압밀 시험기를 고안하였다. 모델의 추가적인 검증을 위하여 기존에 제안된 간편 해석법을 적용한 결과와 Axi-Selcon의 해석결과와 비교하였다. 마지막으로, Axi-Selcon을 적용하여 가상의 대심도 준설매립지반의 거동을 예측하였다. 이와 같은 일련의 모델 검증과정을 통해 본 논문에서 개발된 Axi-Selcon은 자중압밀 도중 연직배수재 타설과 선행재하공법이 적용될 경우에 대한 초연약 준설매립지반의 압밀 거동을 적절히 예측할 수 있음을 보였다.

Keywords : Self-weight consolidation, Non-linear finite strain consolidation, Dredged material, Vertical drain

1. 서론

준설매립지반 설계시 압밀 소요시간 단축을 위해 연직배수공법과 선행재하공법등의 연약지반 개량공법을 주로 적용한다. 압밀에 소요되는 시간은 배수거리에 큰 영향을 받기 때문에 연직배수재를 타설하면 방사방향으로 추가적인 배수통로를 확보하여 압밀 소요시간을 효과적으로 단축시킬 수 있다. 그리고 준설매립지반에 하중을 미리 재하하는 선행재하공법의 경우 압밀 침하 촉진 및 지반의 강도 증대효과를 얻을 수 있다.

In-situ상태가 아닌 인위적으로 조성된 준설매립지반은 자중의 영향을 무시할 수 없으며 실제로 준설토 투기시 자중에 의한 압밀이 지배적으로 발생한다. 준설매립지반의 자중에 의한 압밀이 완료되기까지는 많은 시간이 소요되고 공사비 절감, 공기단축의 이유로 연약지반 개량공법은 자중압밀 도중 적용된다. 즉, 보다 현실적인 준설매립지반의 거동 해석을 위해서는 연직배수재와 선행재하등의 연약지반 개량공법과 준설토의 자중에 의한 압밀을 동시에 고려해야 한다.

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

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 유한변형 압밀 지배방정식과 이를 적용하기 위한 수치모델(Axi-Selcon)을 개발하였다. 개발된 수치해석 모델은 연직배수재가 설치된 준설매립지반의 압밀과정 동안 간극비의 변화에 따른 지반의 압축성과 투수계수의 비선형성, 준설토 자중압밀을 해석에 고려할 수 있다. 수치해석 모델은 2차원 축대칭으로 토체의 자중압밀을 포함하여 지배방정식을 유도하였고, 유한차분 해석기법을 적용하였다.

개발된 수치해석 모델의 검증과 자중압밀 도중 연직배수재가 타설된 준설매립지반을 모사하기 위해 일련의 실내시험을 수행하였다. 연직배수재가 타설된 준설매립지반을 모사하는 대형자중압밀 시험기를 고안하였고, 자중압밀 시작부터 연직배수재가 타설되는 조건과 자중압밀이 50%, 70% 진행되었을 때 연직배수재가 타설되는 조건에 대해 실내시험을 실시하였다. 또한, 추가적인 검증을 위하여 Carillo(1942)의 이론식을 고려하여 안용훈 등(2010)이 제안한 간편 이론해와 Axi-Selcon의 해석결과와 비교하였다. 안용훈 등(2010)의 간편 이론해에서는 연직방향 비선형 유한변형 압밀 해석은 Morris(2002)의 이론해와 PSDDF의 해석결과를 이용하고, 방사방향 해석은 Barron(1948)이 제시한 이론해를 적용한다.

마지막으로 Axi-Selcon을 적용하여 가상의 대심도 준

설매립지반의 거동을 예측하였다. 압밀도가 10%, 30%, 50%, 70%, 90%에 이르렀을 때 연직배수재가 타설되는 조건에 대해 대심도 준설매립지반에서 자중압밀 도중 연직배수재의 타설로 발생하는 압밀거동 변화에 대해 고찰하였다. Axi-Selcon을 적용하여 연직배수재와 선행 압밀공법이 적용된 대심도 준설매립지반의 거동을 압밀도가 30%, 50%, 70%가 진행되었을 때 연직배수재의 타설과 선행압밀 하중재하가 일어난다고 가정하여 해석하였다. 본 논문에서 예측한 대심도 준설매립지반은 가상의 매립조건에 대한 예비해석으로서 향후 연직배수재가 타설된 실제 지반에 대한 Axi-Selcon의 적용성 검토가 추후 연구를 통해 수행될 예정이다.

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

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 식 (3)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

식 (4)에서 h 는 전수두, k_v 와 k_r 는 각각 연직방향 수평방향 투수계수이며 이 투수계수는 간극비(e)의 함수이다. 임의의 시간에 토체 내에 존재하는 유체 체적은 다음과 같다.

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

식 (5)를 시간 t 에 대해 미분하여 정리하면 시간에 따른 토체 내부 유체의 부피 변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

2. 자중압밀을 고려한 2차원 축대칭 비선형 유한 변형 압밀해석

2.1 지배 방정식 유도

연직배수재는 일반적으로 삼각형이나 사각형의 격자 형태로 타설되며, 하나의 연직배수재가 미치는 영역을 원기둥 모양의 포화된 지반이라 가정하면, 압밀도중 지반의 임의의 지점에 대한 토체의 체적관계는 Fig. 1과 같이 표현할 수 있다.

Gibson 등(1967)은 material coordinate(z), lagrangian coordinate(a), convective coordinate(ξ)를 제시하여 각 좌표계와 간극비 사이의 관계를 다음 식 (1)과 (2)와 같이 나타내었다.

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

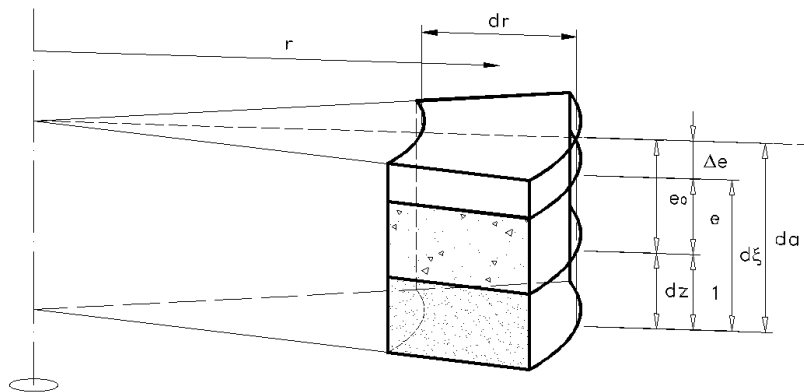


Fig. 1. Volumetric relationship during consolidation in dredged placement with vertical drain

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

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

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

식 (7)을 간단히 하면,

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

이때, 전수두 h 를 과잉간극수압 u 와 물의 단위중량 γ_w 로 표기하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} r = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k_v \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{\gamma_w r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_h r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (9)$$

준설토의 자중압밀과 응력단계에 따른 간극비-유효응력 관계를 적용하기 위하여 식 (9)의 연속 방정식에 토체내 힘의 평형관계를 고려하여 과잉간극수압(u)을 유효응력과 간극비의 항으로 나타내도록 한다.

Fig. 1에서 흙의 자중은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} (rd\xi dr d\theta) \quad (10)$$

여기서, γ_s 는 흙 입자의 단위중량이다.

토체의 평형관계에 대해 식을 세운 후, 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \xi} + \frac{e\gamma_w + \gamma_s}{1+e} = 0 \quad (11)$$

식 (11)에서 σ 는 전응력을 의미한다. 한편, 과잉간극수압(u)은 전응력 σ 와 유효응력 σ' , 정수압 u_0 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \sigma - \sigma' - u_0 \quad (12)$$

식 (12)를 각 좌표방향으로 미분하고, 식 (11)을 사용하여 간단히 정리하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial \xi} &= \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} - \frac{\partial \sigma'}{\partial \xi} + \gamma_w = -\frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} - \frac{\partial \sigma'}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial r} &= -\frac{\partial \sigma'}{\partial r} \end{aligned} \quad (13)$$

식 (9)에 식 (13)을 대입하여 정리하면 다음과 같이 표현되고,

$$\begin{aligned} \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[k_v \left(\frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} + \frac{\partial \sigma'}{\partial \xi} \right) \right] + \\ \frac{1}{r} \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_h \frac{\partial \sigma'}{\partial r} r \right) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $dz = \frac{d\xi}{1+e}$ 와 $\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial F}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial z}$ 관계를 적용하면 식 (14)는 다음과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{1+e} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right) + \\ \frac{1+e}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_h \frac{\partial \sigma'}{\partial r} r \right) + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

최종적으로 $\frac{\partial F}{\partial z} = \frac{\partial F}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial z}$ 와 $\frac{\partial F}{\partial r} = \frac{\partial F}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial r}$ 의 관계를 적용하여 각 물리량의 깊이방향 및 방사방향의 변화율을 간극비에 대한 변화율과 간극비의 깊이방향 및 방사방향 변화율로 나타내면 식 (15)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\gamma_w} \left[\left(\gamma_c \beta(e) + \frac{\partial \alpha(e)}{\partial z} \right) \frac{\partial e}{\partial z} + \alpha(e) \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \right] + \\ \frac{1}{\gamma_w} \left[(\lambda(e) + \theta(e)) \left(\frac{\partial e}{\partial r} \right)^2 + \mu(e) \frac{1}{r} \frac{\partial e}{\partial r} + \mu(e) \frac{\partial^2 e}{\partial r^2} \right] + \\ \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,

$$\alpha(e) = \frac{k_v(e)}{1+e} \frac{\partial \sigma'}{\partial e}$$

$$\beta(e) = \frac{d}{de} \left(\frac{k_v(e)}{1+e} \right)$$

$$\lambda(e) = (1+e) \frac{\partial k_h(e)}{\partial e} \frac{\partial \sigma'}{\partial e}$$

$$\mu(e) = (1+e) k_h(e) \frac{\partial \sigma'}{\partial e}$$

$$\theta(e) = (1+e) k_h(e) \frac{\partial^2 \sigma'}{\partial e^2}$$

식 (16)은 준설패립지반의 자중을 고려한 2차원 축대칭 비선형 유한변형 압밀거동의 지배방정식이 된다. 식 (16)에서 $k_v(e)$ 와 $k_h(e)$ 는 각각 간극비의 함수로 표시되는 연직방향과 수평방향 투수계수이며 $\frac{\partial \sigma'}{\partial e}$ 와 $\frac{\partial^2 \sigma'}{\partial e^2}$ 는

간극비에 대한 유효응력의 변화율을 나타낸다. 식 (16)에서 제시된 파라미터를 통해 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수의 비선형 관계를 표현할 수 있다. 식 (16)을 유한차분 형태로 나타내면 다음과 같다.

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

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

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

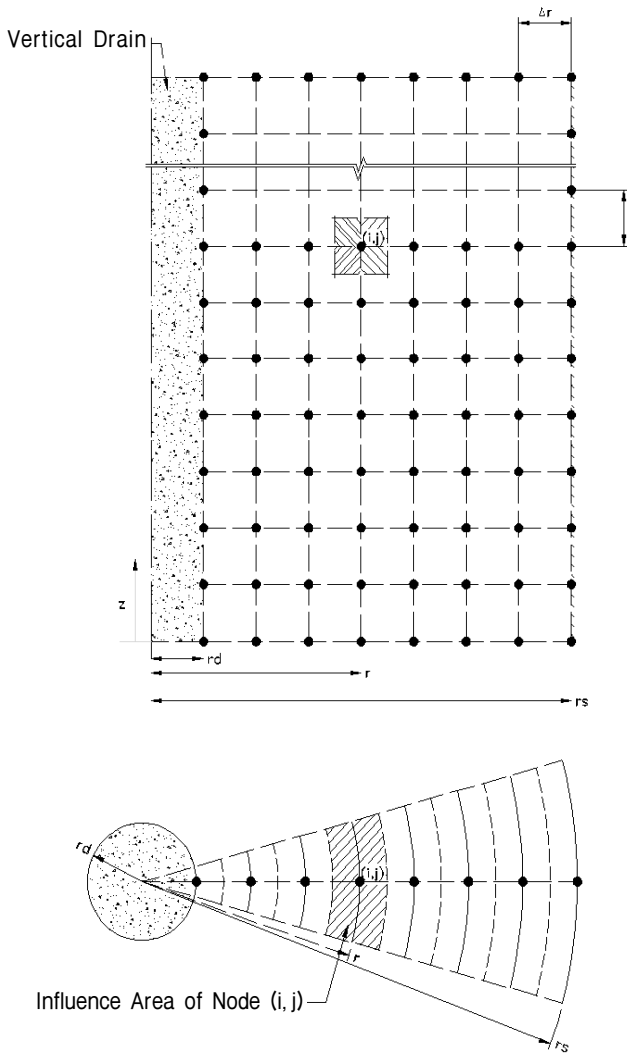


Fig. 2. 2-D axisymmetric finite difference mesh configuration

여기서, 아래첨자 i, j 는 각각 방사방향과 연직방향의 절점번호이고 위첨자 t 는 시간을 나타낸다. 식 (17)은 임의의 시간 t 단계의 간극비를 사용하여 $t+1$ 단계의 간극비를 계산하는 외제적 방법(explicit method)을 적용한다.

Axi-Selcon에 사용한 해석격자는 Fig. 2와 같다. 여기서 r_s 는 연직배수재의 유효반경, r_d 는 연직배수재의 반경, Δz 는 연직방향 격자의 크기, Δr 은 방사방향 격자의 크기를 의미한다.

2.2 모델의 경계조건

연직배수재가 타설된 준설패립지반을 모사하기 위해 배수 경계조건과 비배수 경계조건인 2가지 경계조건을 적용하였다. 배수 경계조건에서는 유효응력을 계산하여 입력치인 간극비-유효응력 관계로부터 간극비를 도출한다. 즉, 배수 경계조건에서의 간극비는 준설패립지반 타설 즉시 압밀이 완료되는 것을 가정하였다. 준설패립지반의 상부는 배수 경계조건이며 재하응력이 없는 경우에 준설토의 초기간극비가 유지된다. Fig. 2에서 $r=r_d$ 인 연직배수재와 준설패립지반 사이는 배수 경계조건을 사용하여 연직배수재를 타설하는 즉시 과잉간극수압 u_g 가 0이 되어 압밀이 완료된다는 것을 가정하였다.

Fig. 2에서 $z=0$ 인 준설패립지반 하부 경계조건은 일

면 및 양면배수 조건에 따라 비배수 또는 배수 경계조건을 사용하였다. 양면배수 조건을 적용할 경우에는 준설토를 투기하는 시점에 하부 경계면에서 과잉간극수압이 0이 되어 최종압밀에 도달하도록 하였다. 일면배수 경우는 하부 경계면에서 연직방향흐름 q_w 가 발생하지 않음의 것이므로 Darcy's 법칙을 사용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = 0 \quad (18)$$

식 (18)을 식 (11)과 식 (12)에 대입하여 정리하면

$$-\frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} - \frac{\partial \sigma'}{\partial \xi} = 0 \quad (19)$$

$\frac{\partial \sigma'}{\partial \xi} = \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \xi}$ 관계와 식 (1)을 적용해 식 (19)를 간단히 하면 다음과 같다.

$$\gamma_s - \gamma_w + \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

최종적으로 식 (20)을 유한차분식으로 나타내면

$$e_{i-1,j} = e_{i+1,j} + 2\Delta z(\gamma_s - \gamma_w) \times \frac{\partial e}{\partial \sigma'} \quad (21)$$

$z = 0$ 인 지점에서 $e_{i-1,j}$ 는 아랫방향으로 Δz 만큼의 거리를 가지는 가상의 절점 도입하였다. Fig. 2에서 $r = r_s$ 인 지점은 불투수 경계조건(no flux)을 사용하여 해석하였다. $z = 0$ 인 경우의 해석과 동일하게 방사방향으로 Δr 만큼 이격된 가상의 절점을 생성하여 해석을 수행하며, 불투수 경계일 경우 $r = r_s$ 에서 수평방향의 흐름은 발생하지 않으므로 동수경사 혹은 수압경사를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 \quad (22)$$

식 (22)를 간극비의 향으로 나타내어 유한차분화 시키면 다음과 같은 경계조건이 얻어진다.

$$e_{i,j+1} = e_{i,j-1} \quad (23)$$

식 (23)을 사용하여 경계면 해석에 필요한 각 절점에서의 간극비를 계산한다.

3. 연직배수재를 고려한 자중압밀 시험

3.1 시험 장비 및 방법

본 논문에서는 제안된 모델의 적합성을 판단하기 위하여 균질한 카올리나이트를 실험에 적용하였다. 실내 시험에 적용한 카올리나이트 시료의 기본 물성치는 Table 1에 정리하였고, 실내 시험장비는 Fig. 3에 나타내었다. 시험 장비는 직경 30cm, 높이 20cm의 투명 아크릴 셀과 아크릴 셀을 장착할 수 있는 몸체로 구성되어 있다. 아크릴 셀 중심부에 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴 통을 장치하였고, 시험장비 하부의 원기둥형 아크릴을 고정시키는 장치와 다수의 배수구를 독립적인 밸브에 연결하여 배수와 비배수 조건을 용이하게

Table 1. Material properties of Kaolinite

Material	Specific Gravity	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plasticity Index (%)	USCS
Kaolinite	2.65	61.2	30.4	30.8	CH



Fig. 3. Lab-scaled self-weight consolidation test equipment embedding vertical drain

적용할 수 있게 제작되었다. 즉, 연직배수재의 배수조건과 별개로 연직방향으로의 일면 및 양면배수 조건을 고려할 수 있다. 연직배수재 역할을 하는 지름 6cm의 원통형 아크릴에는 하부판과 동일하게 측면에 다수의 배수구가 존재하며, 자중압밀이 진행되는 동안 점토 슬러리가 배수구를 통과하는 것을 막기 위하여 원통형 아크릴 외부는 여과지를 부착하였다(안용훈 등, 2010).

일반적인 실내 자중압밀시험과 다르게 본 논문에서 고안한 시험장비에는 아크릴 셀 중심부에 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴을 추가로 설치된다. 자중압밀시험 진행 중 시료가 침하하면서, 원기둥형 아크릴 외부와 시료 사이에 마찰이 발생하여 시험결과에 영향을 줄 수 있다. 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴의 외부에 감싸는 재료와 시료사이의 마찰에 대한 영향을 평가하기 위하여 원기둥형 아크릴의 외부에 감싸는 재료를 변화시키면서 자중압밀시험을 수행하였다. 실험결과를 반영하여 일반적인 PBD 코어를 감싸는 외부 필터재와 동일한 토포섬유(polypropylene)를 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴의 외부를 감싸는 재료로 선정하여 연직배수재가 미리 타설된 준설매립지반의 일면 및 양면배수 조건의 압밀거동을 모사한 시험을 수행하였다.

또한, 자중압밀 도중 준설매립지반에 타설된 연직배수재의 영향을 고려하기 위한 시험방법을 적용하였다. 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴을 배수가 일어나지 않도록 조절하다가 1차원 자중압밀의 진행이 50%, 70% 시점에 이르렀을 때 연직배수재의 방사방향 배수를 허용하였다. 즉, 연직배수재의 배수조절 시기는 1차원 자중압밀이 50%와 70%가 진행되었을 때인 2가지 조건에 대하여 시험을 시행하였다.

3.2 실내시험 결과

양면배수 조건에 대하여 비닐(plastic), 필터 페이퍼(filter paper), PBD에 사용되는 필터재(polypropylene)를 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴의 외부에 부착하고, 연직배수재의 배수를 고려하지 않은 100cm 높이의 1차원 조건의 자중압밀시험에 대한 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4를 살펴보면 비닐(plastic)을 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴 외부에 부착하였을 때 준설토의 침하가 가장 빠른 것을 알 수 있다. 필터 페이퍼와 PBD

에 사용되는 필터재의 계면고 변화는 거의 유사하며, PBD에 사용되는 필터재를 사용하였을 경우가 준설토 침하속도가 근소하게 빠른 것을 알 수 있다. Fig. 4의 결과를 반영하여 실제로 PBD에 사용되는 필터재를 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴 외부에 부착하고 연직방향으로 일면과 양면배수 조건에 대하여 연직배수재의 배수를 고려한 100cm 높이의 자중압밀시험의 시험결과는 Fig. 5에 비교하였다.

Fig. 5의 시험결과를 보면, 일면배수 조건보다 양면배수 조건의 압밀속도가 빠른 것을 알 수 있다. 초기함수비가 동일한 조건에서도 최종침하량이 양면배수 조건일 경우가 약간 크게 나타났다. 이는 양면배수 조건에서 하방향으로 침투수력(Seepage Force)이 추가적으로 발생하여 유효응력의 증가를 가져오기 때문으로 유추할 수 있다.

안용훈 등(2010)은 본 논문에서 사용한 대형자중압밀 시험장비와 동일한 장비를 이용하여 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴 외부에 필터 페이퍼를 부착한 조건에서 연직배수재를 고려한 일면 및 양면배수 조

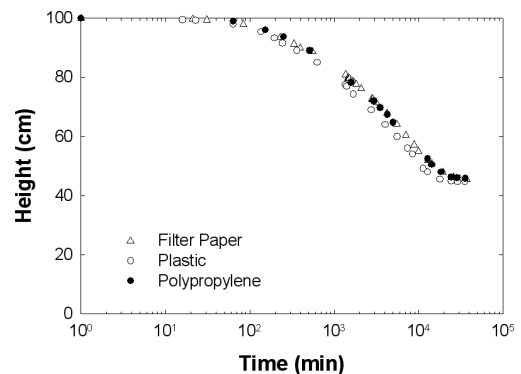


Fig. 4. Effect of filter materials on 1-D self-weight consolidation (without radial drainage)

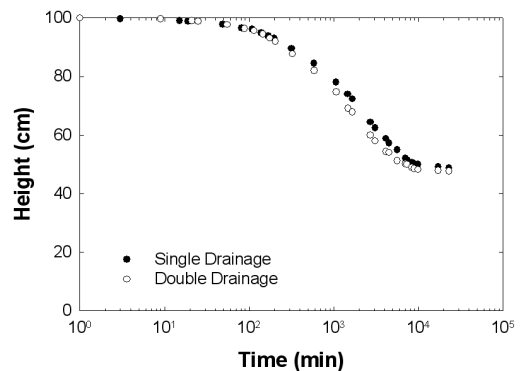
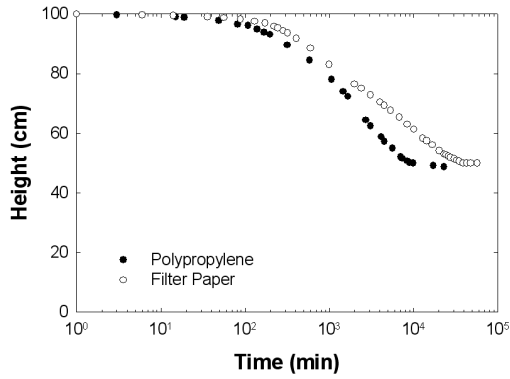
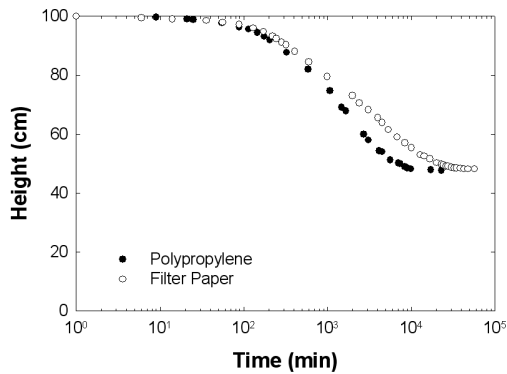


Fig. 5. Results of self-weight consolidation considering vertical drain



(a) Single drainage



(b) Double drainage

Fig. 6. Effect of filter materials on 2-D axisymmetric self-weight consolidation (with radial drainage)

건에서 실내시험을 하였다. 이 결과와 PBD 코어를 감싸는 외부 필터재와 동일한 토목섬유(polypropylene)를 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴의 외부에 부착하여 수행한 본 논문의 시험결과를 비교하여 Fig. 6에 나타냈다.

Fig. 4에서 비교한 방사방향 배수를 고려하지 않은 1차원 압밀조건에서의 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴 외부를 감싸는 재료와 준설토의 마찰에 대한 영향은 필터 페이퍼와 PBD에 사용되는 필터재간의 시간-계면고 그래프의 차이는 미소하였다. 하지만, Fig. 6에서와 같이 연직배수재의 방사방향 배수를 고려한 비교 시험에서의 차이가 크게 나타났다. 연직배수재가 타설되면 압밀속도가 증가되기 때문에 자중압밀 도중 필터재와 준설토의 마찰효과가 1차원 자중압밀보다 크게 나타난다.

양면배수 조건에 대하여 PBD에 사용되는 필터재를 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴 외부에 부착하고 자중압밀도가 50%, 70%인 시점에서 연직배수재 타설을 고려한 100cm 높이의 자중압밀시험의 결과는 Fig. 7과 같다. 즉, 1차원 자중압밀 도중 압밀도가 각각

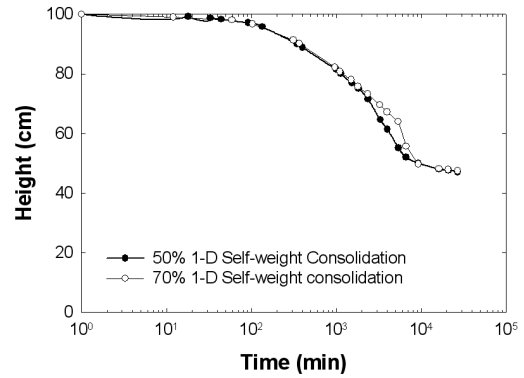


Fig. 7. Comparison of installation time of vertical drain during self-weight consolidation

50%, 70%에 이르렀을 때 연직배수재의 방사방향 배수를 고려한 시험 결과이다. 압밀도는 총 침하량 기준으로 계산하였으며 양면배수 조건에 대하여 시험이 시행되었다. 연직배수재의 효과가 발현되면 압밀속도가 급격히 빨라지는 것을 알 수 있다. Fig. 7의 시험결과는 개발된 모델의 검증에 위한 자료로 활용된다.

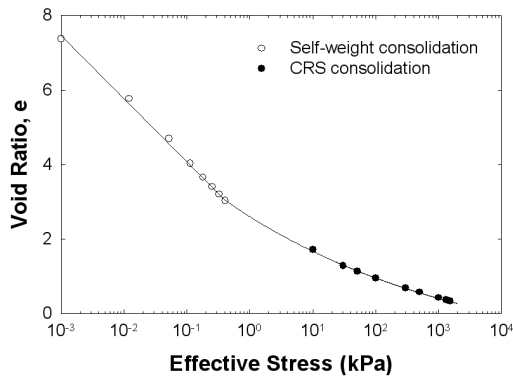
4. 모델 (Axi-Selcon)

4.1 실내시험 결과와 비교

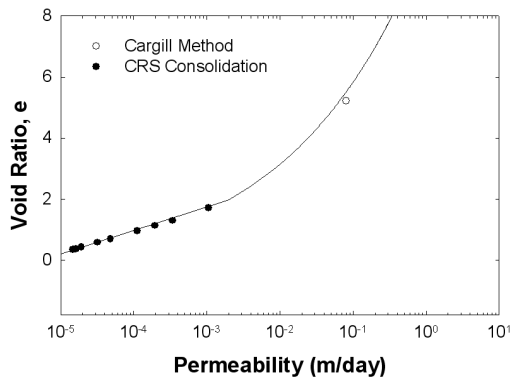
본 논문에서 개발된 Axi-Selcon의 검증과 연직배수재가 타설된 준설토의 거동 분석을 위하여 앞 절에서 수행한 대형자중압밀 시험결과를 이용하였다. 실내 시험에 적용한 카올리나이트에 대한 수치해석 입력치인 비선형 압밀 물성치는 초기간극비, 간극비-유효응력 관계, 간극비-투수계수 관계는 안용훈 등(2010)의 결과를 적용하였다. 초기간극비(void ratio at zero effective stress)는 침강압밀이 끝나고 자중압밀이 시작되는 초기 상태에서의 시료의 간극비를 의미한다. 초기간극비는 침강과정과 압밀과정 사이의 경계면에 해당하는 상태를 의미하며, 이는 준설토 입자들이 서로 접촉하기 시작하여 입자간의 응력을 전이하는 순간의 간극비를 의미한다. 따라서 이론적으로 초기간극비 상태에서의 유효응력은 영(zero)이다. 일반적으로 초기간극비를 측정하는 방법에는 Znidarcic(1999)이 제안한 시료 표면에서의 시료를 채취하여 함수비를 측정하는 시료표면 채취법과 광태훈 등(2011)이 제안한 시료표면의 전기 비저항 값을 통해 산정하는 전기 비저항 탐침법이 있다. 본 실내시험에서는 초기간극비를 시료 표면 채취법으로

산정한 7.38를 적용하여 자중압밀을 위한 시료를 조성하였으며, 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계는 Fig. 8에 나타냈다.

Axi-Selcon의 해석 격자망은 앞 절의 Fig. 2와 같으며 실험장비의 재원을 고려하여 프로그램의 해석 격자망의 조건을 $r_d = 3\text{cm}$, $r_s = 15\text{cm}$, $h = 100\text{cm}$ 로 해석을 수행하였다. 실내시험은 균질한 카올리나이트 시료로 시행되어 층상구조가 없으므로 연직방향과 방사방향의 투수계수는 같다고 가정하고 수치해석을 수행하였다.



(a) Void ratio - Effective stress



(b) Void ratio - Permeability

Fig 8. Nonlinear consolidation characteristics of Kaolinite

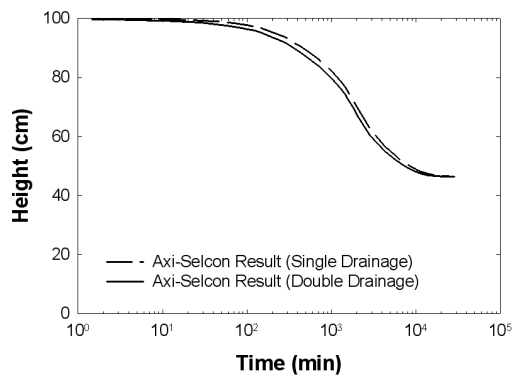
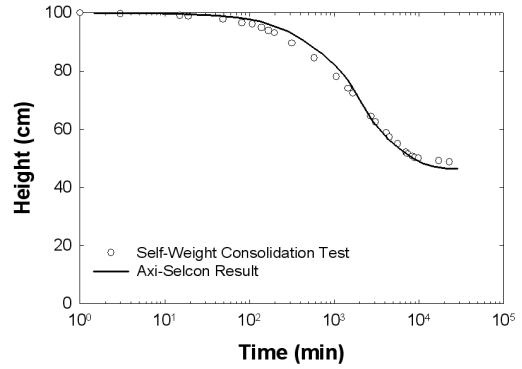
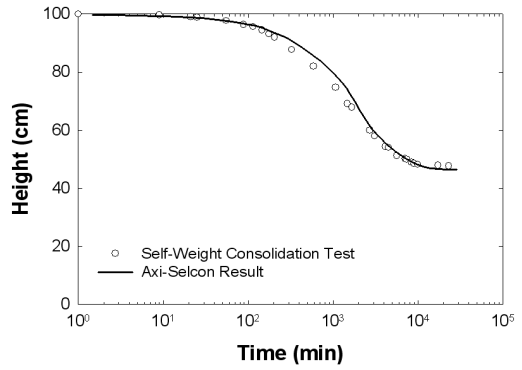


Fig. 9. Self-weight consolidation considering vertical drain analyzed by Axi-Selcon

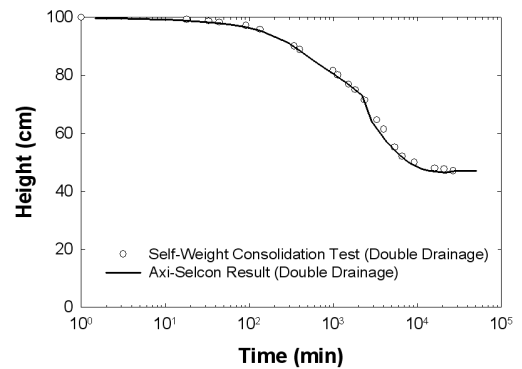


(a) Single drainage

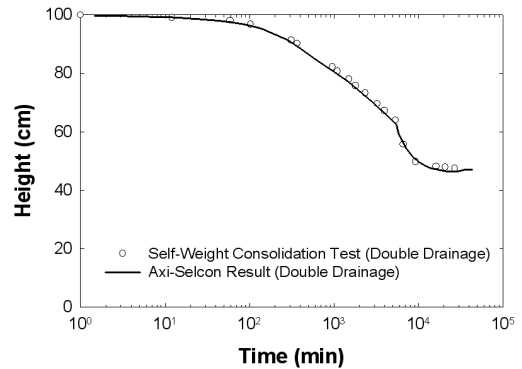


(b) Double drainage

Fig. 10. Comparison of self-weight consolidation test and numerical analysis: Installing vertical drain at degree of consolidation = 0%



(a) At degree of consolidation = 50%



(b) At degree of consolidation = 70%

Fig. 11. Comparison of self-weight consolidation test and numerical analysis: Installing vertical drain at degree of consolidation = 50% and 70%

일면 및 양면배수 시험조건에 대한 수치해석 결과는 Fig. 9와 같다. 연직배수재를 타설하더라도 100cm 규모에서는 일면배수 조건보다 양면배수 조건에서 압밀이 진행되는 속도가 약간 빠른 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 일면배수, 양면배수 조건에 대해서 연직배수재를 자중압밀 시작 시점에 설치한 조건을 고려한 자중압밀 시험결과(Fig. 5)와 수치해석 결과를 비교를 보여준다. 본 논문에서 개발한 프로그램(Axi-Selcon)은 연직배수재의 타설시기를 자유롭게 설정할 수 있다. 따라서 Axi-Selcon의 해석결과와 양면배수 조건에 대하여 자중압밀이 50%, 70% 진행된 도중 연직배수재 타설을 고려한 100cm 높이의 자중압밀 시험결과(Fig. 7)를 Fig. 11에 도시하였다. 전반적으로 자중압밀 시험결과와 수치해석 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서, Axi-Selcon이 자중압밀이 진행되는 도중 연직배수재가 타설되는 준설패립지반의 거동을 적절히 해석할 수 있음을 알 수 있다.

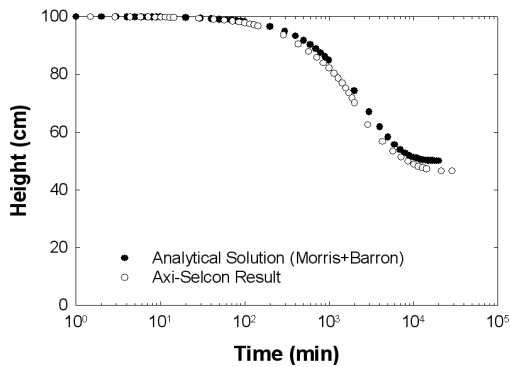
4.2 간편 해석법(안용훈 등, 2010)와 비교

안용훈 등(2010)은 비선형 유한변형 자중압밀이 진

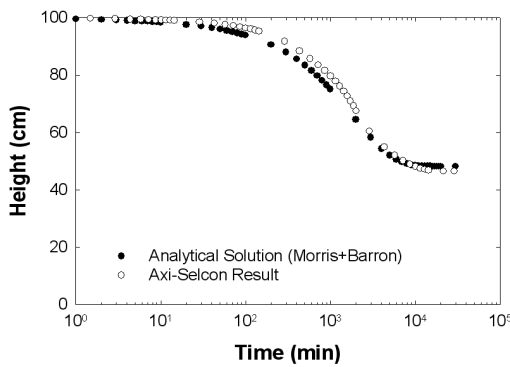
행되는 도중에 연직배수재가 시공된 조건을 모사하기 위해 준설패립지반의 연직방향 및 방사방향을 모두 고려할 수 있는 간편 해석방법을 제안하였다. 연직방향의 1차원 비선형 유한변형 자중압밀은 Morris(2002)의 이론해와 PSDDF 해석결과를 적용하였고, 방사방향 압밀은 Barron(1948)이 제시한 이론해를 도입하였다. 각각의 연직방향과 방사방향을 압밀도를 Carillo(1942)의 제안식을 적용하여 연직배수재가 설치된 준설패립지반의 자중압밀을 예측하는 방법을 제시하였다.

Morris(2002)가 제안한 이론해는 자중압밀 시험결과로부터 연직방향 압밀계수를 50% 압밀도를 기준으로 연직방향 압밀계수를 전체 압밀과정 중 고정값으로 단순화한 것에 비하여, 안용훈(2010)은 압밀 계수 산정에 관한 오차를 줄이기 위해서 수치해석인 PSDDF해석 결과를 이용하여 각 응력단계에서 비선형성을 고려하기 위해 유한변형 압밀 계수를 산정하는 방법을 제안하였다.

Axi-Selcon의 타당성을 검증하기 위해 Carillo(1942)식을 근간으로 안용훈 등(2010)이 제시한 간편 해석법과 비교하였다. Axi-Selcon의 경우 지배방정식을 연직방향과 방사방향을 모두 고려하여 유도함으로써 연직방향과 방사방향이 완전히 연계된 해석인 반면

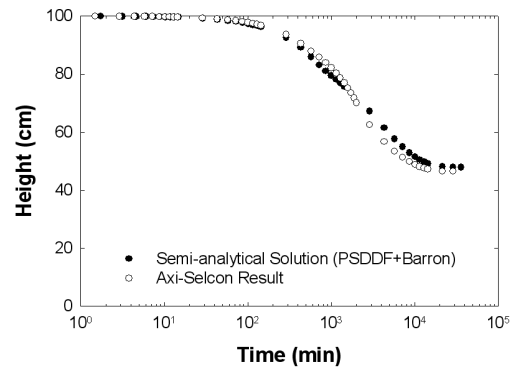


(a) Single drainage

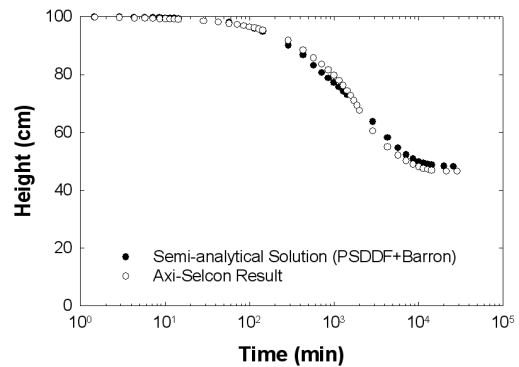


(b) Double drainage

Fig. 12. Comparison of Axi-Selcon and simple analysis method (Morris+Barron)



(a) Single drainage



(b) Double drainage

Fig. 13. Comparison of Axi-Selcon and simple analysis method (PSDDF+Barron)

Carillo식을 근간으로 하는 간편 해석법은 연직방향의 흐름과 방사방향 흐름이 발생하였을 때 압밀을 각각 계산하여 단순히 중첩시켜서 총 압밀량을 산정하는 방법의 차이점이 있다. 간편 해석법은 Morris(2002)의 연직방향 이론해와 Barron(1948)의 방사방향 이론해를 사용한 단순화된 해석적 방법(analytical method)과 PSSDF의 연직방향 수치해석 결과와 Barron(1948)의 방사방향 이론해를 사용한 단순화된 부분해석적(semi-analytical method) 방법이다. 이론해의 해석 조건과 Axi-Selcon의 해석 조건은 본 논문에서 시행한 실내시험 조건을 사용하였다.

Axi-Selcon 해석결과와 간편 해석법(안용훈 등, 2010) 중, Morris(2002)의 연직방향 이론해와 Barron(1948)의 방사방향 이론해를 적용한 해석결과를 Fig. 12에 비교하였다. 또한 Fig. 13은 간편 해석법 중, PSSDF의 연직방향 수치해석 결과와 Barron(1948)의 방사방향 이론해를 사용한 해석결과와 Axi-Selcon의 해석 결과를 비교한 그래프이다. Axi-Selcon과 간편 해석법에서 연직방향과 방사방향 흐름의 적용하는 방법의 차이에도 불구하고 두 해석결과는 각각 유사한 거동을 보인다. 특히, 본 논문에서 개발한 Axi-Selcon 해석결과는 실내시험결과를 50% 압밀도를 기준으로 단순화 시킨 Morris(2002)의 이론해를 적용한 간편 해석결과보다 PSSDF의 해석결과를 적용한 간편 해석법과 보다 유사하다.

5. 연직배수재를 고려한 준설패립지반의 압밀 거동 예측

5.1 연직배수재의 타설시기를 고려한 수치해석 결과

Axi-Selcon을 적용하여 대심도 준설패립지반의 연직 배수재로 인한 압밀 거동을 예측하였다. 자중압밀 도중 연직배수재가 타설되는 조건에 대하여 Axi-Selcon 수치 해석과 간편 해석법(안용훈 등, 2010) 중 부분 해석적(semi-analytical method)방법을 비교하고, 추가적으로 연직배수재가 타설되지 않은 조건에 대하여 PSSDF를 이용한 일차원 자중압밀 수치해석 결과와 비교하였다.

준설패립지반의 두께가 10m, 20m인 가상의 지반조건에 대하여 압밀도가 10%, 30%, 50%, 70%, 90%일 때 연직배수재가 타설되는 것을 조건에 대하여 해석을 수행하여 해석결과를 Fig. 14~18에서 비교 하였다. 준설패립지반은 카올리나이트로 구성되었다고 가정하여 앞에서 제시한 카올리나이트 시료의 비선형 압밀 입력치

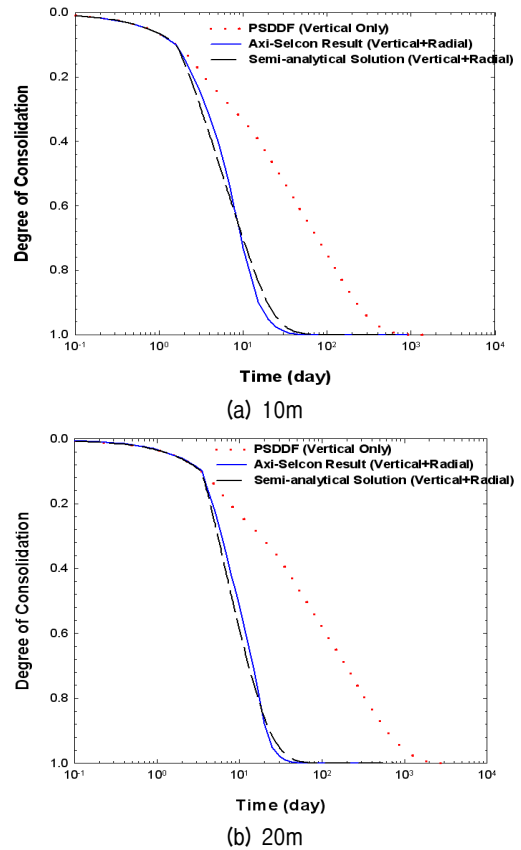


Fig. 14. Installation of vertical drain at degree of consolidation = 10%

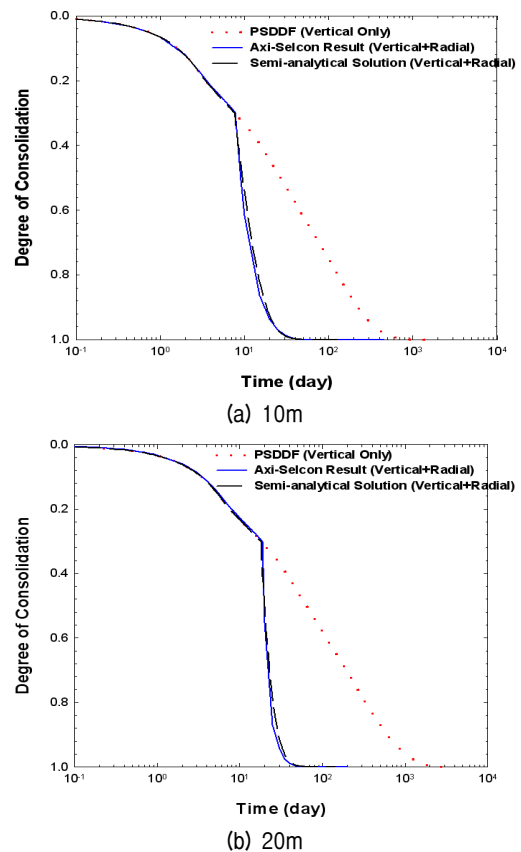


Fig. 15. Installation of vertical drain at degree of consolidation = 30%

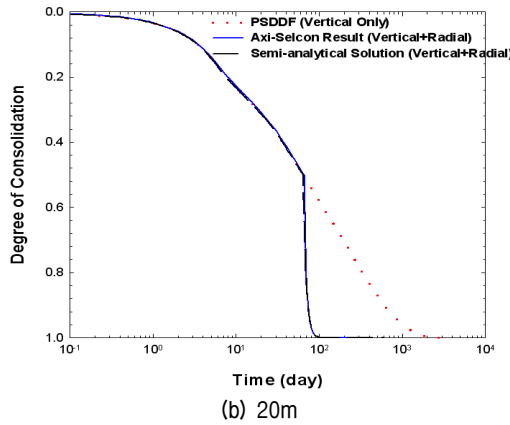
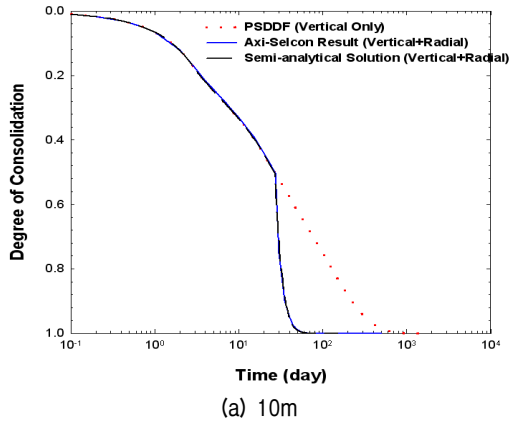


Fig. 16. Installation of vertical drain at degree of consolidation = 50%

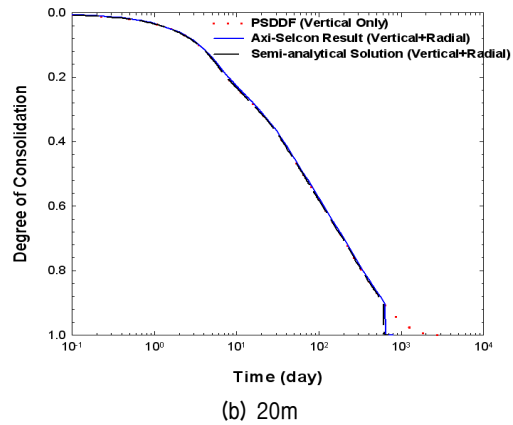
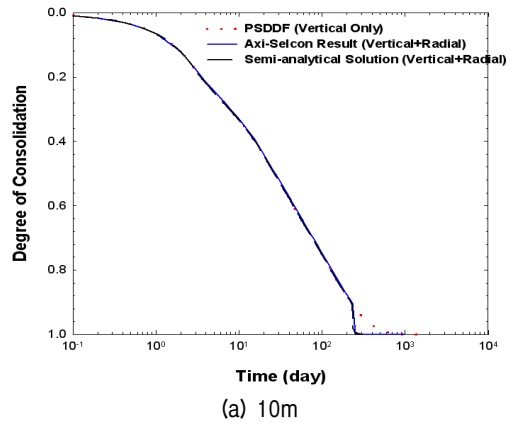


Fig. 18. Installation of vertical drain at degree of consolidation = 90%

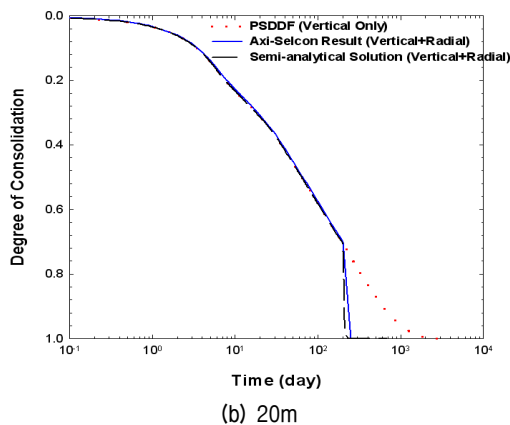
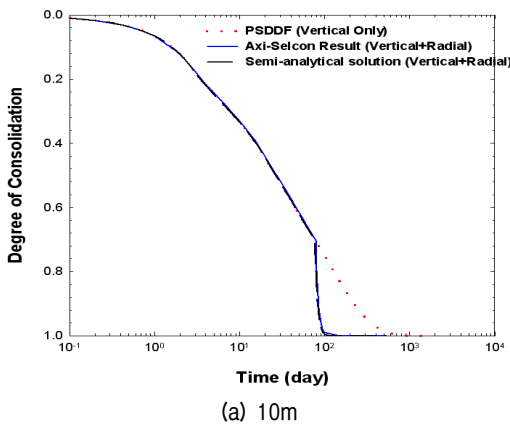


Fig. 17. Installation of vertical drain at degree of consolidation = 70%

를 사용하였다. 준설패립지반은 층상구조가 없다고 가정하여 연직방향과 방사방향의 투수계수는 같다고 설정하고 해석을 수행하였다.

각 해석방법 비교에서 준설패립지반에 연직배수재가 타설됨으로써 압밀시간을 단축시킬 수 있고, 연직배수재의 타설 시점이 빠를수록 연직배수재로 인한 효과가 큰 것을 알 수 있다. 연약지반을 개량할 경우, 연직배수재 타설을 위한 장비가 운용될 수 있는 표층강도가 확보될 수 있으면, 최대한 빠른 시기에 연직배수재를 타설할수록 연약지반의 압밀시간을 단축시킬 수 있다.

5.2 연직배수공법과 선행압밀공법을 고려한 수치해석 결과

준설패립지반에는 압밀 소요시간 단축을 위해 연직배수공법과 선행압밀공법 등의 연약지반 개량공법을 주로 적용한다. Axi-Selcon은 자중압밀이 진행되는 도중 연직배수재 타설에 의한 효과와 선행압밀을 위한 추가 하중재하를 고려할 수 있다. 연직배수재 타설과 하중재하의 영향을 평가하기 위해 양면배수 조건에 대한

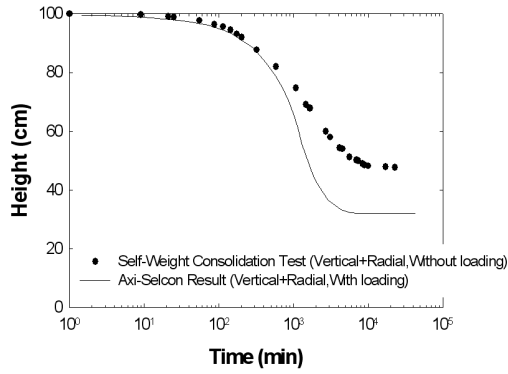


Fig. 19. Effect of surface loading on Axi-Selcon analysis

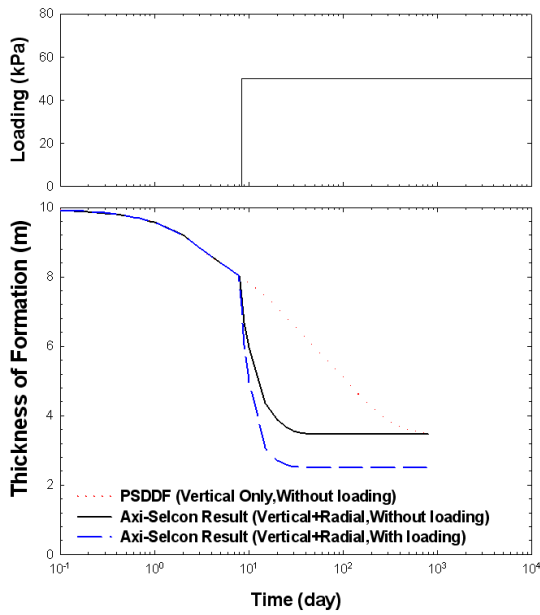


Fig. 20. Activation of vertical drain and surface loading at degree of consolidation = 30%

100cm 높이의 준설패립지반에 대해 연직배수재의 타설과 선행재하공법이 적용되었을 경우의 압밀거동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 연직배수재를 고려한 실내 자중압밀 시험 조건에서 초기 시료를 패립한지 1분이 경과한 후 10kPa이 재하되도록 수치해석을 수행하였다. Fig. 19는 연직배수재를 고려한 실내 자중압밀 시험결과와 연직배수재 타설과 하중재하를 모두 고려한 Axi-Selcon 해석결과의 비교를 보여준다. 연직배수재가 타설되고 추가 하중이 재하될 경우 압밀이 진행되는 속도가 빨라짐을 알 수 있다.

준설패립지반의 두께가 10m인 가상의 지반조건에 대하여 압밀도가 30%, 50%, 70%일 때 연직배수재가 타설되고 동시에 선행압밀공법이 적용되는 경우에 대한 압밀거동을 Axi-Selcon을 이용하여 연직배수재와 하

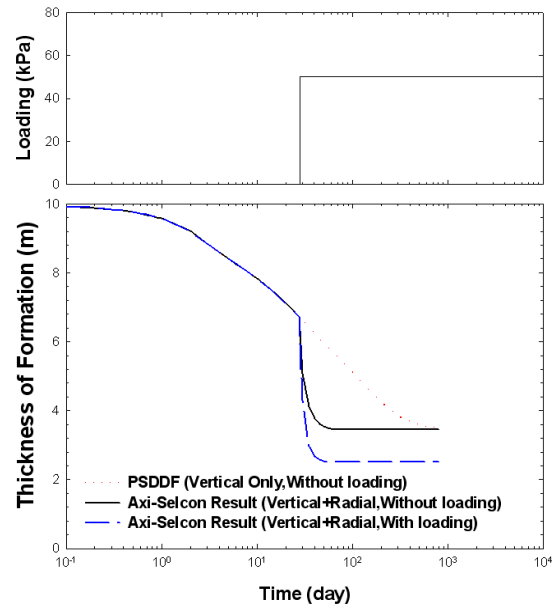


Fig. 21. Activation of vertical drain and surface loading at degree of consolidation = 50%

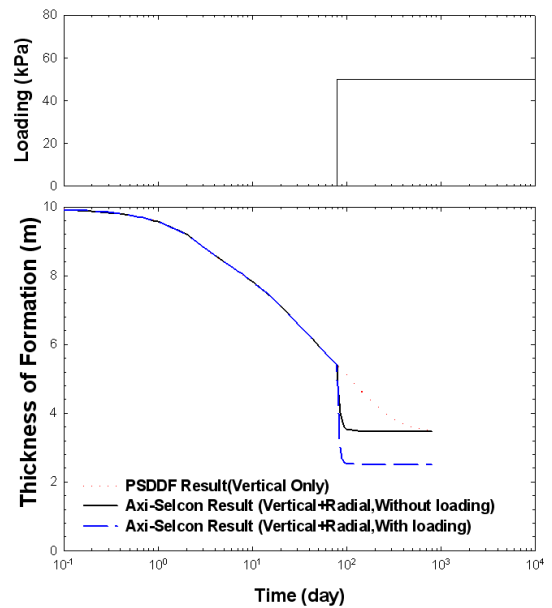


Fig. 22. Activation of vertical drain and surface loading at degree of consolidation = 70%

중재하고 동시에 이루어지는 조건과 연직배수재만 타설되는 조건, 그리고 비교의 목적으로 연직배수재와 하중재하를 고려하지 못하고 오직 일차원 자중압밀 조건을 해석할 수 있는 PSDDF 해석결과를 비교하였다. 연직배수재가 타설되면서 동시에 선행압밀 하중 50kPa 재하되는 것을 모사하여 해석을 수행하였다. 준설패립지반은 균질한 카올리나이트 지반으로 가정하여 카올리나이트의 비선형 압밀 물성치를 사용하였고, 양면배

수 조건과 층상구조가 없는 지반을 가정하였다. Fig. 20~22은 압밀도가 30%, 50%, 70%일 때 각 해석결과의 비교를 보여준다. Axi-Selcon이 연직배수재와 선행압밀 공법이 동시 적용 되었을 경우 압밀속도와 압밀 침하량을 효과적으로 예측할 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 준설매립지반의 연직방향 자중압밀이 진행되는 도중, 연직배수재 타설에 의한 방사방향의 흐름이 추가로 발생하는 경우의 자중압밀을 고려한 2차원 축대칭 비선형 유한변형 압밀 지배방정식과 이를 적용하기 위한 수치모델 (Axi-Selcon)을 개발하였다. 카울리나이트를 사용한 실내 시험결과, 간편 해석법과의 비교를 통해 Axi-Selcon을 검증하였고, 연직배수재 타설 공법이 적용된 준설매립지반의 거동을 예측하였다.

- (1) 준설매립지반에서 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. 또한, 유도된 지배방정식을 적용한 유한차분 해석프로그램(Axi-Selcon)을 개발하였다.
- (2) 양면배수 조건에 대하여 PBD에 사용되는 필트재를 연직배수재 역할을 하는 원기둥형 아크릴 외부에 부착하고 자중압밀도가 50%, 70%인 시점에서 연직배수재 타설을 고려한 100cm 높이의 자중압밀 시험에서 각 압밀도에서 연직배수재의 효과가 발현되면 압밀속도가 급격히 빨라지는 것을 확인하였다.
- (3) Axi-Selcon의 해석결과와 양면배수 조건에 대하여 자중압밀이 50%, 70% 진행된 도중 연직배수재 타설을 고려한 100cm 높이의 자중압밀 시험결과를 비교한 결과, 전반적으로 자중압밀 시험결과와 수치해석 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서, Axi-Selcon이 자중압밀이 진행되는 도중 연직배수재가 타설되는 준설매립지반의 거동을 적절히 해석할 수 있음을 알 수 있다.
- (4) Axi-Selcon 해석결과와 간편 해석법(안용훈 등, 2010) 비교에서 연직방향과 방사방향 흐름을 고려하는 방법의 차이에도 불구하고 유사한 거동을 보

인다. 특히, Axi-Selcon 해석결과는 실내시험결과를 50% 압밀도를 기준으로 단순화 시킨 Morris(2002)의 이론해를 적용한 간편 해석결과보다 PSDDF의 해석결과를 적용한 간편 해석법과 보다 유사하다.

- (5) Axi-Selcon을 사용하여 연직배수재 타설 공법과 선행재하공법이 적용된 준설매립지반의 거동을 분석하였다. 연직배수재가 타설되고 선행재하공법이 적용되면 준설매립지반의 압밀시간을 단축시킬 수 있으므로 연직배수재 타설을 위한 장비가 운용될 수 있는 표층강도가 확보될 수 있으면, 최대한 빠른 시기에 연직배수재를 타설할수록 연약지반의 압밀시간을 효과적으로 단축시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설 기술혁신사업(09기술혁신 E06)과 고려대학교 특별연구비 (T1001611)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. An, Y. (2010), *Experimental Study of Two-dimensional Axisymmetric Non-linear Finite Strain Consolidation Theory*, MS thesis, Korea University, Seoul, Republic of Korea.
2. An, Y., Kwak, T., Lee, C., Choi, H. and Choi, E. (2010), "Non-linear Finite Strain Consolidation of Ultra-soft Soil Formation Considering Radial Drainage", *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.26, No.11, pp.17-28.
3. An, Y., Kwak, T., Lee, C., Choi, H. and Choi, E. (2010), "Non-linear Finite Strain Consolidation of Ultra-soft Soil Formation Considering Radial Self-weight Consolidation", *Proceedings of Korean Geotechnical Society Spring Conference, KGS*, pp.495-508.
4. Archie, G. E. (1942), "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, Vol.146, pp.54-62.
5. ASTM D 4186-82, "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled strain loading", American Society for testing and Materials, Philadelphia, USA.
6. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol.113, pp.718-742.
7. Cargill, K. W. (1982), "Consolidation of soft layers by finite strain analysis", *Miscellaneous Paper GL-82-3*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, MS.
8. Cargill, K. W. (1983), "Prediction of consolidation of very soft soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.6.
9. 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
10. 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, pp.1-5.
 11. 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, pp.261-273.
 12. Hindebrand, F. B. (1949), “Advanced calculus for engineers”, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
 13. Imai, G. (1981), “Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials”, *Soil and Foundations*, Vol.21, No.1, pp.7-20.
 14. Kwak, T., Lee, C., Lim, J., An, Y. and Choi, H. (2011), “Analysis Method for Non-Linear Finite Strain Consolidation for Soft Dredged Soil Deposit Part I: Parameter Estimation for Analysis”, *Journal of Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.27, No.9, pp.13-24.
 15. Lo, D. O. K. (1991) Soil Improvement by Vertical Drains, PhD. Dissertation, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
 16. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), “Time- and stress -compressibility interrelationships”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.103, No.5, pp.417-430.
 17. Morris, P. H. (2002), “Analytical solutions of linear finite-strain one -dimensional consolidation”, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.128, No.4, pp.319-326.
 18. Stark, T. D., Choi, H. and Schroeder, P. R. (2005), “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.
 19. Stark, T. D., Choi, H. and Schroeder, P. R. (2005), “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.
 20. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. and Heilberg, S., (1971), “Consolidation at constant rate of strain”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.97, No.SM10, pp.1393-1413.
 21. Znidarcic, D. (1999), “Predicting the behavior of disposed dredging soils”, *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.2, pp.877-886.

(접수일자 2011. 9. 18, 심사완료일 2012. 8. 10)