

방사방향 자중압밀을 고려한 초연약 지반의 비선형 유한변형 압밀거동 분석 Non-linear Finite Strain Consolidation of Ultra-soft Soil Formation Considering Radial Self-weight Consolidation

안용훈¹⁾, Yonghoon An, 곽태훈²⁾, Taehoon Kwak, 이철호³⁾, Chulho Lee, 최항석⁴⁾, Hangseok Choi,
최은석⁵⁾, Eunseok Choi

¹⁾ (주)건화, Kunhwa Consulting & Engineering Co., Ltd.

²⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Architectural & Environmental Engineering, Korea University

³⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Architectural & Environmental Engineering, Korea University

⁴⁾ 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Architectural & Environmental Engineering, Korea University

⁵⁾ (주)에스디이엔지, SD Eng.

SYNOPSIS : Vertical drains are commonly used to accelerate the consolidation process of soft soils, such as dredged materials. The installation of vertical drain provides a radial drainage path to water in the deposit soil in addition to the vertical direction. An estimation of time rate of settlement is considerably complicated when vertical drains are installed to enhance consolidation process of dredged material because the vertical drains are commonly installed before self-weight consolidation is ceased. In this paper, the vertical drain theory developed by Barron(1948) is applied to analyze the non-linear consolidation behavior considering radial drainage. The overall average degree of self-weight consolidation of the dredged soil under the condition that the water is drained in both radial and vertical directions is estimated using the Carillo(1942) formula. In addition, the Morris(2002) theory and the one-dimensional non-linear finite strain numerical model, PSDDF, are applied to analyze the self-weight consolidation in case of only the vertical drainage is considered. The new analysis approach proposed herein can simulate properly the time rate of the self-weight consolidation of dredged materials that is facilitated with vertical drains.

Keywords : vertical drains, self-weight consolidation, time rate consolidation, PSDDF

1. 서론

초연약 준설패립토의 시간에 따른 압밀침하량과 압밀속도의 정확한 예측은 준설패립지반 개량공사에서 매우 중요한 요소이다. 이러한 준설패립토의 압밀을 촉진하기 위해 연직배수공법을 적용하는데, 이는 연직배수재의 방사방향 압밀을 유도함으로써 전체 압밀 소요시간을 단축하는 목적을 갖는다. 보통 준설패립지반의 자중압밀 완료는 패립지반의 두께에 따라 몇 년이 소요될 수 있기 때문에, 실제 현장에서의 연직배수재는 준설패립토의 자중압밀이 완료되기 전에 시공되는 것이 일반적이다. 현재까지 연직배수재에 관한 연구내용은 주로 자중압밀이 완료된 준설패립지반에 대한 미소변형이나 비선형 유한변형 압밀 해석에 국한되었다. 본 연구에서는 초연약 준설패립지반의 자중압밀 이전에서 연직배수재 타설에 따른 연직방향과 방사방향 자중압밀을 모두 고려할 수 있는 비선형 유한변형 압밀거동 해석 방법을 제시하고

일련의 실내시험 및 수치해석을 통하여 이를 검증하였다.

2. 비선형 유한변형 압밀이론

압밀이 진행되는 동안 투수계수가 일정하고 미소변형이며, 간극비와 유효응력이 선형 관계라는 가정의 Terzaghi의 일차원 압밀이론은 압축성이 큰 준설패립지반과 같은 초연약지반의 압밀거동을 예측하는데 적합하지 않다. 실제로 준설패립지반과 같은 초연약지반은 압밀 침하량이 크고 압밀이 진행되는 동안 지반의 투수계수가 응력수준에 따라 변화하며, 간극비와 유효응력의 관계가 비선형이다. 따라서 실제 초연약지반의 압밀거동을 예측하기 위해서는 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계의 비선형성을 고려한 유한변형 압밀이론의 적용이 필요하다.

간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 관계를 선형으로 가정한 Terzaghi의 압밀이론의 한계를 극복하기 위하여 Gibson 등(1967)은 대 변형이 발생하는 초연약지반의 압밀거동 해석을 위한 비선형 유한변형 압밀이론을 간극수와 흙 입자로 구성된 혼합체에서의 평형방정식, 흙 입자와 간극수의 시간변화에 따른 연속방정식, 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계로부터 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{(1+e)} \right] \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서, z 는 Material coordinate, e 는 간극비, $k(e)$ 는 간극비에 따른 투수계수, γ_s 와 γ_w 는 각각 흙 입자와 간극수의 단위중량, σ' 은 유효응력, t 는 시간이다.

Gibson 등(1967)은 비선형 유한변형 압밀이론식을 유도하면서 기존의 Darcy의 법칙을 수정하여 흙 입자와 간극수의 이동속도를 모두 고려한 상대속도 개념을 적용한 수정 Darcy의 법칙을 이용하였다. 또한, 비선형 유한변형 압밀이론식에 다음과 같은 비선형계수 $g(e)$ 와 $\lambda(e)$ 를 도입하였다.

$$g(e) = - \frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \quad (2)$$

$$\lambda(e) = - \frac{d}{de} \left(\frac{de}{d\sigma'} \right) \quad (3)$$

식 (1)의 비선형 유한변형 압밀이론식은 자중압밀을 고려할 수 있고, 시간에 따라 변하는 간극비의 함수로 투수계수가 표현되며, 응력단계에 따른 간극비-유효응력 관계를 적용할 수 있기 때문에 큰 압축성을 갖는 준설패립지반과 같은 초연약지반의 압밀거동을 예측하는데 적합하다.

편미분 방정식인 Gibson 등(1967)의 비선형 유한변형 압밀이론식은 이론적인 해를 구할 수 없기 때문에 Cargill(1982)에 의해 수치해석이 가능한 유한 차분식으로 표현하였다. Cargill(1982)은 간극비와 투수계수의 함수인 $\beta(e)$, 간극비와 투수계수, 압축계수의 함수인 $\alpha(e)$ 와 물질좌표계를 이용하여 유한차분식을 다음의 식 (6)과 같이 표현하였다.

$$\beta(e) = \frac{d}{de} \left(\frac{k(e)}{1+e} \right) \quad (4)$$

$$\alpha(e) = \frac{k(e)}{1+e} \frac{d\sigma'}{de} \quad (5)$$

$$e_{i,i+j} = e_{i,j} - \frac{\tau}{\gamma_w} \left\{ \left[\gamma_c \beta(e_{i,j}) + \left[\frac{\alpha(e_{i+1,j}) - \alpha(e_{i-1,j})}{2\Delta z} \right] \right] \right. \\ \left. \times \left[\frac{e_{i+1,j} - e_{i-1,j}}{2\Delta z} \right] + \alpha(e_{i,j}) \left[\frac{e_{i+1,j} - 2e_{i,j} + e_{i-1,j}}{\Delta z^2} \right] \right\} \quad (6)$$

비선형 유한변형률 압밀해석 프로그램인 PSDDF(Primary consolidation, Secondary compression and Desiccation of Dredged Fill, (Stark 등, 2005))는 Cargill(1982)의 유한차분식을 적용하여 비선형 유한변형 압밀거동을 보이는 준설패립지반의 압밀해석을 수행할 수 있도록 한다. PSDDF는 압축성이 큰 준설패립토의 일차압밀, 이차압밀, 건조수축을 모두 고려할 수 있다. PSDDF 해석을 위해서는 일차압밀, 이차압밀, 건조수축에 대한 입력 데이터가 필요한데, 그 중 일차압밀과 관련이 있는 준설패립토의 초기 간극비, 간극비-유효응력 관계, 간극비-투수계수 관계의 정확성이 요구된다. 이차압밀은 일차압밀이 완료되는 시점부터 발생하는 압축 크리프 현상으로 PSDDF에서는 Mesri와 Godlewski(1977)가 제안한 이차압밀의 시간에 따른 압축지수(C_α)와 일차압밀의 압축지수(C_c)의 비가 임의의 압밀응력 하에서 일정하다는 C_α/C_c 개념이 도입되었다.

Gibson 등(1967)은 식 (1)과 같은 비선형 유한변형 압밀이론식의 이론적인 해를 구할 수 없기 때문에 비선형 압밀계수 $g(e)$ 와 $\lambda(e)$ 를 상수로 가정하여 비선형인 초연약지반의 투수성과 압축성을 선형화하여 식 (1)을 다음 식 (7)과 같이 단순화하였다.

$$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2} + \lambda(\gamma_s - \gamma_w) \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{1}{g} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (7)$$

여기서, λ 는 선형화 상수, g 는 유한변형 압밀 계수이다.

유한변형 압밀계수(g)는 일반적인 Terzaghi의 압밀계수(c_v)와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$g = \frac{c_v}{(1+e)^2} \quad (8)$$

또한, 변수들을 정규화·무차원화하였고, 이러한 변수들로 식 (7)을 정규화·무차원화된 형태로 표현하였으며 이로부터 Morris(2002)는 일면배수 및 양면배수 조건에 대하여 다음의 이론식을 각각 제시하였다.

$$U(T) = 1 - 2\pi^2 N \left(\frac{\left[\exp\left(\frac{N}{2}\right) - \exp\left(-\frac{N}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{N^2 T}{4}\right)}{N + \exp(-N) - 1} \right) \times \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \left(\frac{n^2 \left[\exp\left(-\frac{N}{2}\right) + (-1)^{n+1} \right] \exp(-n^2 \pi^2 T)}{\left[\left(\frac{N}{2}\right)^2 + (n\pi)^2 \right]^2} \right) \quad (9)$$

$$U(T) = 1 - 2N^2 \left(\frac{\exp\left(\frac{N}{2} - \frac{N^2 T}{4}\right)}{N + \exp(-N) - 1} \right) \times \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \left(\frac{\alpha_n \sin(\alpha_n) \exp(-\alpha_n^2 T)}{\left[\alpha_n^2 + \left(\frac{N}{2}\right)^2 + \frac{N}{2} \right] \left[\alpha_n^2 + \left(\frac{N}{2}\right)^2 \right]} \right) \quad (10)$$

3. 방사방향 압밀을 고려한 압밀이론 해석

3.1 Barron의 방사방향 압밀 이론

준설패립지반의 자중 및 재하하중에 의한 압밀거동은 대부분 연직방향으로만 배수조건이 형성되어

Gibson 등(1967)의 1차원 비선형 유한변형 압밀이론으로 충분히 예측이 가능하다. 그러나 압밀 촉진 및 준설매립지반 개량을 위해 연직배수재를 타설한 경우, 방사방향의 배수조건이 추가되어 연직방향만을 고려한 1차원 비선형 유한변형 압밀이론으로 연직배수재가 설치된 지반의 압밀거동을 정확히 예측하는 것은 어렵다.

Barron(1948)은 방사방향 압밀에 대한 가장 포괄적인 해법을 제시하였는데, 자유변형(free strain)과 균등변형(equal strain)이라는 두 가지의 극단적인 경우에 대한 평균 압밀도가 거의 동일하다는 것을 보여주었다. 또한 Barron(1948)은 연직배수재로 인한 배수저항(well resistance)과 교란효과(smear)를 고려하였다. Barron(1948)은 다음과 같은 가정을 기초로 하여 방사방향 압밀해를 제시하였다. (1) 초기에 모든 연직하중은 과잉간극수압을 발생시킨다. 즉, 점토층은 포화상태이다. (2) 적용 하중은 균등하게 분포되며 점토층의 모든 압축 변형은 연직방향으로 발생한다. (3) 연직배수재의 유효 구역은 원형이며 축대칭이다. (4) 점토층의 투수계수에 비해 연직배수재의 투수계수는 매우 크다. (5) Darcy의 법칙이 성립한다. 이러한 가정을 바탕으로 하여 연직배수재로 인한 방사방향 압밀에 대해 자유변형가정에 기초한 정확한 해와 균등변형가정에 기초한 근사 해를 제시하였고, 자유변형과 균등변형으로부터 산정된 예상 과잉간극수압의 차이가 거의 없음을 보여주었다. 균등변형압밀 조건으로부터 Barron(1948)이 제시한 방사방향 압밀이론해는 식 (11)과 같다.

$$\bar{U}_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (11)$$

여기서, T_h 는 방사방향 압밀의 시간계수, $\left(T_h = \frac{c_h t}{D^2}\right)$, c_h 는 방사방향 압밀계수, $\left(c_h = \frac{k_h(1+e)}{a_v \gamma_w}\right)$, a_v 는 점토층의 압축계수를 의미한다. 본 연구에서는 자중압밀 도중에 점토가 층상으로 배열하지 않고 균등하게 분포한다고 보고, 연직방향 압밀계수(c_v)와 방사방향 압밀계수(c_h)가 동일하다고 가정하였다.

$$g = \frac{c_h}{(1+e)^2} \quad (12)$$

여기서, 간극비(e)는 앞에서 압밀도가 50%일 때의 시간계수(T_{50})와 계면고의 변화가 총 침하량의 50%일 때의 시간(t_{50})을 산정하는 것과 유사하게 초기간극비(e_{00})와 최종간극비(e_{∞})의 산술평균값을 사용하였다.

3.2 연직방향과 방사방향을 고려한 Carillo의 압밀 이론

연직배수재가 타설된 준설매립지반의 연직방향과 방사방향 배수가 동시에 발생하는 조건에 대한 압밀해는 Carillo(1942)에 의해 다음의 식 (13)과 같이 제안되었다.

$$1 - U = (1 - U_r)(1 - U_z) \quad (13)$$

여기서, U 는 임의의 시간에서 점토층의 평균압밀도, U_z 는 임의의 시간에서 연직방향 평균압밀도, U_r 는 임의의 시간에서 방사방향 평균압밀도를 의미한다. 본 논문에서는 Morris(2002)의 압밀이론해와 PSDDF 해석결과를 연직방향 평균압밀도로, Barron(1948)의 압밀이론해를 방사방향 평균압밀도로 적용한, 비연계해석을 통한 방사방향 흐름을 고려한 비선형 유한변형 압밀거동을 검토하였다.

4. 연직배수재를 설치한 자중압밀 시험

방사방향을 고려한 자중압밀 거동분석을 위하여 100cm 높이의 대형자중압밀 시험 장비를 고안하였다 (그림 1). 대형자중압밀 시험 장비는 지름 30cm, 높이 20cm의 투명 아크릴 통으로 제작되어 자중압밀이 진행되는 동안 외부에서 계면고의 변화를 확인할 수 있다. 또한 각 아크릴 셀에는 자중압밀이 진행되는 동안 시간에 따른 깊이별 간극수압을 측정할 수 있는 간극수압계 설치용 벨브가 장치되어 있다. 대형자중압밀 시험장비의 하부판은 하방향으로 배수조건을 모두 모사할 수 있도록 다수의 배수구멍이 있다. 시험장치 중심에 연직배수재 역할을 하는 원통형 아크릴을 고정할 수 있는 고정장치가 존재하며 연직배수재를 통한 배수를 가능하게 하기 위하여 고정 장치에도 하부에 배수구멍을 설치하였다. 하부판의 배수구멍은 벨브와 연결되어 있어 하부판에서의 배수 및 비배수 조건을 조절할 수 있다. 즉, 하부 배수 시 양면배수 조건을, 하부 비배수 시 일면배수 조건을 모사할 수 있다. 방사방향 배수량과 연직방향 배수량을 비교하기 위하여 하부 연직배수재 고정장치와 하부판의 배수구멍은 독립된 서로 다른 벨브로 연결되어 있다. 연직배수재 역할을 하는 원통형 아크릴의 길이가 100cm 이기 때문에 하부 뿐만 아니라 상부에서도 고정할 수 있는 고정 장치가 존재한다.



그림 1. 연직배수재를 고려한 대형자중압밀 시험 장비

그림 2는 대형자중압밀 시험에서 연직배수재를 모사하는 원통형 아크릴이다.



그림 2. 연직배수재 역할을 하는 원통형 아크릴

대형자중압밀 시험에서 원주형 연직배수재 역할을 하는 지름 6cm의 원통형 아크릴에는 하부판과 마찬가지로 다수의 배수구멍이 존재하며, 자중압밀이 진행되는 동안 점토 슬러리가 배수구멍을 통과하는 것을 막기 위하여 원통형 아크릴 외부는 필터 페이퍼로 감쌌다. 그리고 원통형 아크릴 내부는 투수계수가 충분히 큰 모래를 채워 넣어 실제 준설패립지반에서 사용되는 연직배수재를 모사하였다.

그림 1의 대형자중압밀 시험 장비를 이용하여 연직배수재가 설치된 준설패립지반의 압밀거동을 모사한 시험 결과는 다음의 그림 3과 같다. 그림 3은 일면 및 양면배수 조건에서 시간에 따른 계면고의 변화 그래프이다.

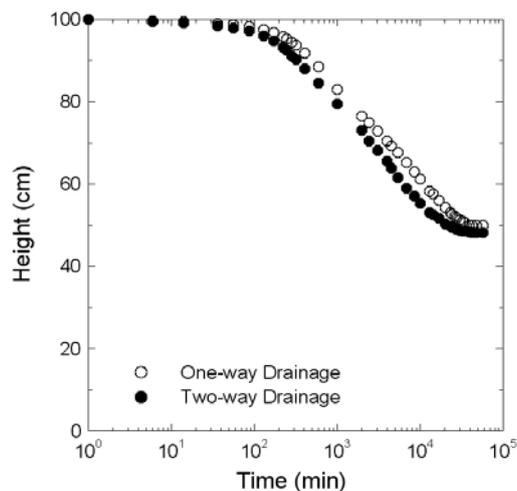


그림 3. 시간에 따른 계면고 변화 (100cm, 연직배수재 포함)

5. 방사방향 압밀을 고려한 압밀이론 해석

카올리나이트 시료에 대한 연직배수재가 삽입된 자중압밀 시험 결과와 Carillo(1942)의 방사방향을 고려한 압밀이론해의 비교를 위하여, 다양한 실내시험조건을 압밀이론해석을 수행하는데 적용하였다. 방사방향 압밀해석을 위해서 필요한 연직배수재의 직경과 점토층의 직경은 연직배수재가 삽입된 카올리나이트의 대형자중압밀 시험에 사용된 연직배수재의 제원을 사용하였다. 또한, 실제 현장에서 준설패립지반의 두께가 1m보다 더 두꺼운 경우에 대해서 이론해를 이용하여 비교하기 위하여 5m, 10m에 대한 이론해석을 실시하였다.

그림 4와 그림 5는 준설패립지반의 두께가 1m인 경우에 대한 Carillo(연직 및 방사방향 압밀)의 이론해와 일면 및 양면 배수조건으로 수행한 대형자중압밀 시험결과를 비교한 그래프이다. 대형자중압밀 시험 결과와 Carillo의 이론해의 비교에서 일면배수 및 양면배수 모두 완전하게 일치하지는 않았으나 전반적인 연직배수재를 고려한 자중압밀 실험결과가 이론해와 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 특히, 자중압밀 시험 후반부에서는 이론해 보다 자중압밀이 다소 지연되는 결과를 보이는데, 이는 연직방향의 자중압밀 거동을 Morris(2002)가 제안한 50% 압밀도를 기준으로 연직방향 압밀계수를 상수로 단순화시켰기 때문으로 유추할 수 있다. 이는 다음 장에 제시된 연직방향의 자중압밀을 PSDDF를 이용하여 각 응력단계 마다 비선형성을 정밀하게 고려하여 개선된 결과와 비교할 수 있다.

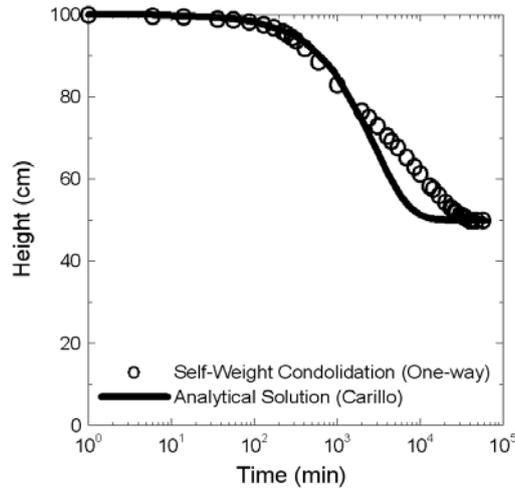


그림 4. 일면배수 자중압밀 시험 결과와 Carillo 이론해 비교 (100cm, 연직배수재 포함)

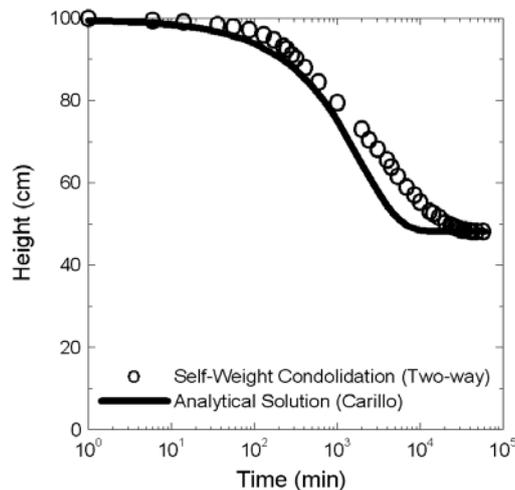


그림 5. 양면배수 자중압밀 시험 결과와 Carillo 이론해 비교 (100cm, 연직배수재 포함)

1m 이상의 두께를 갖는 현장 준설패립 지반에서의 방사방향을 고려한 자중압밀 거동을 예측하기 위하여 준설패립지반의 두께를 5m, 10m로 가정하여 Carillo(1942)의 이론해로 구한 시간에 따른 압밀도를 산정하였다. 그림 6~그림 8은 각각 준설패립지반의 두께가 1m, 5m, 10m인 경우 시간에 따른 이론해를 나타낸다. 각각의 경우에 대한 결과에서, 공통적으로 연직배수재를 설치하지 않은 경우보다 연직배수재가 존재하여 방사방향으로의 배수가 동시에 발생할 경우 압밀속도가 현저하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 준설패립지반의 두께와 관계없이 방사방향의 시간에 따른 압밀도는 변화가 없음을 알 수 있

다. 준설패립지반의 두께가 5m, 10m로 증가할수록 연직방향 압밀만 고려한 경우 압밀속도는 현저하게 감소하고, 방사방향을 고려한 Carillo(1942)의 이론해 그래프가 방사방향 배수만을 고려한 Barron(1948)의 이론해 그래프로 근접하는 것을 볼 수 있다. 이는 준설패립지반의 깊이가 깊어질수록 준설패립지반의 압밀거동은 배수거리가 상대적으로 짧은 연직배수재에 의한 방사방향 배수에 의해 지배받음을 알 수 있다.

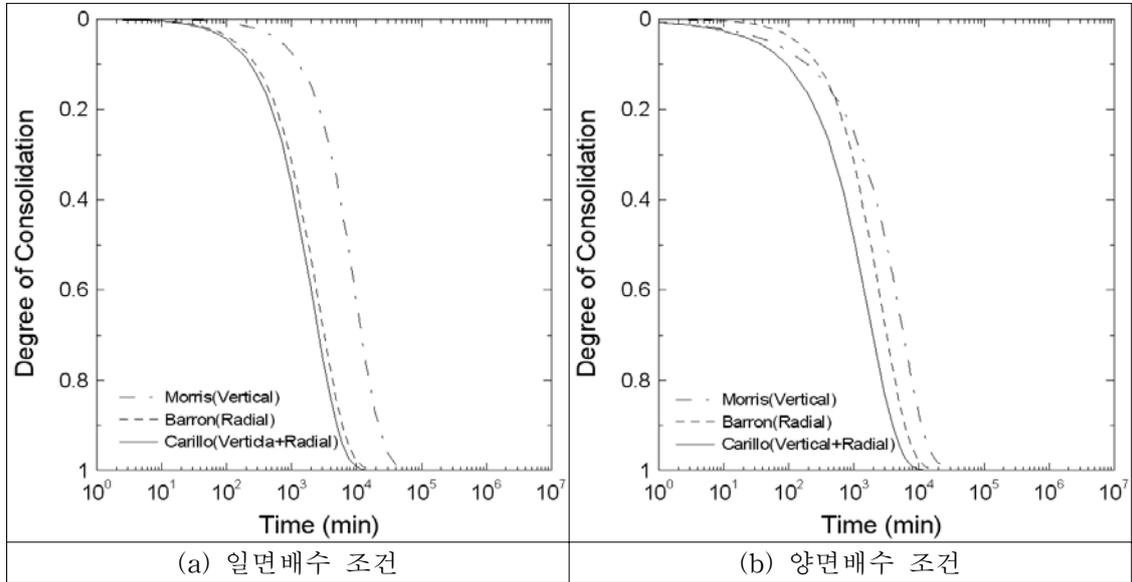


그림 6. 이론해를 통해 산정된 시간에 따른 압밀도 (1m)

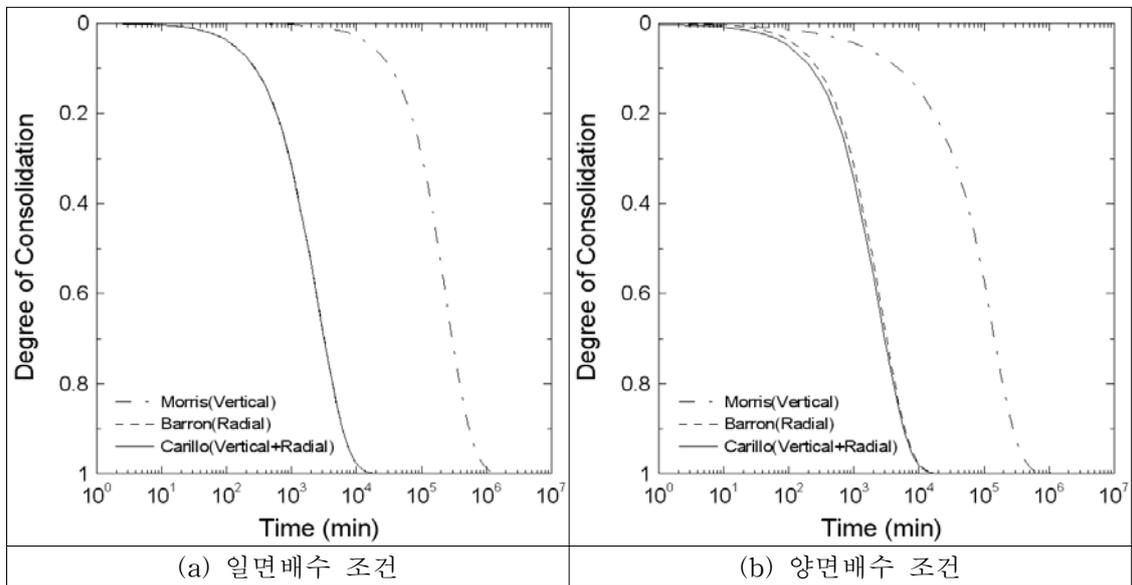


그림 7. 이론해를 통해 산정된 시간에 따른 압밀도 (5m)

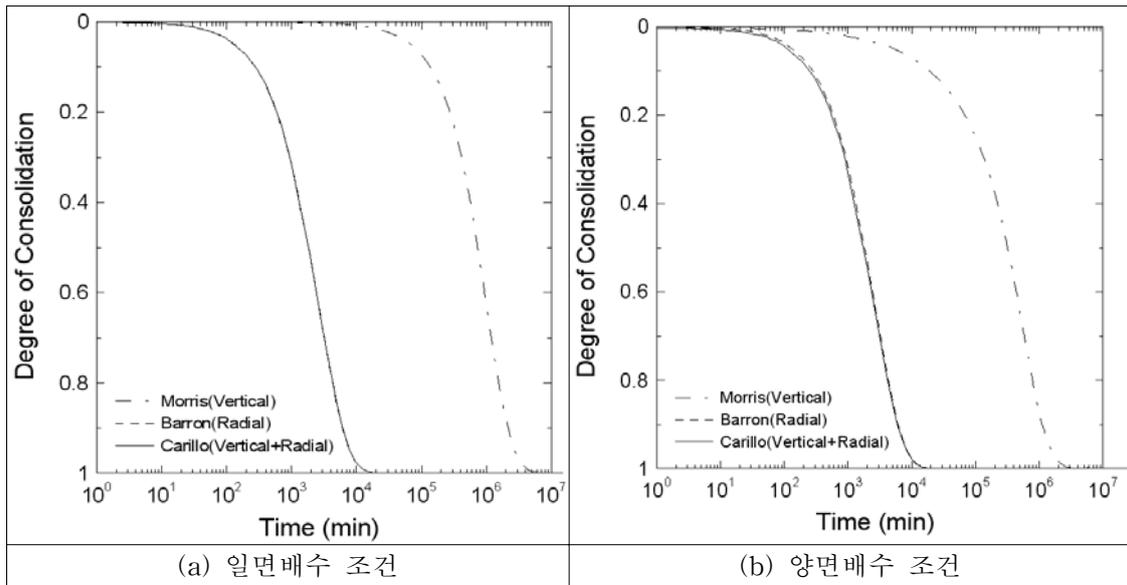


그림 8. 이론해를 통해 산정된 시간에 따른 압밀도 (10m)

6. PSDDF 해석 결과를 활용한 압밀이론 해석

Morris(2002)가 제안한 50% 압밀도를 기준으로 단순화 시킨 유한변형 압밀계수로 인한 오차를 줄이기 위하여 PSDDF 해석 결과를 이용하였다. PSDDF 해석 결과에는 입력 데이터로 적용한 간극비에 대한 유한변형 압밀계수(g)를 산정할 수 있는 $\frac{k}{1+e}$ 와 $\frac{d\sigma'}{de}$ 의 값이 각 간극비에 따라 계산된다. PSDDF 해석에서 각 시간별로 변화하는 간극비 대한 유한변형 압밀계수(g)를 산정하여 방사방향 압밀 이론해인 Barron의 이론해에 적용하였다. 또한, 식 (2)에 PSDDF 해석 결과로부터 산정된 간극비별 유한변형 압밀계수(g)을 대입하여 간극비별 방사방향 압밀계수(c_h)를 산정하였다. 연직방향 자중압밀은 PSDDF 해석 결과를 적용한 후 방사방향을 고려한 Carillo의 이론해를 통해 연직배수재가 설치된 준설매립지반의 압밀거동을 예측하고, 시료두께 1m의 경우는 대형자중압밀 시험결과와 비교하였다. 그림 9와 그림 10은 PSDDF 해석 결과를 적용한 Carillo의 이론해와 대형자중압밀 시험결과와의 비교 그래프이다.

그림 9와 그림 10은 Morris(2002)의 선형화된 압밀해를 적용한 경우(그림 4와 5) 보다, PSDDF 해석 결과를 적용한 경우가 대형자중압밀 시험결과에 더 근접함을 보여준다. 이는 PSDDF 해석 결과로부터 간극비에 따른 유한변형 압밀계수(g)를 적용할 경우 실제 연직배수재가 설치된 준설매립지반의 압밀 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

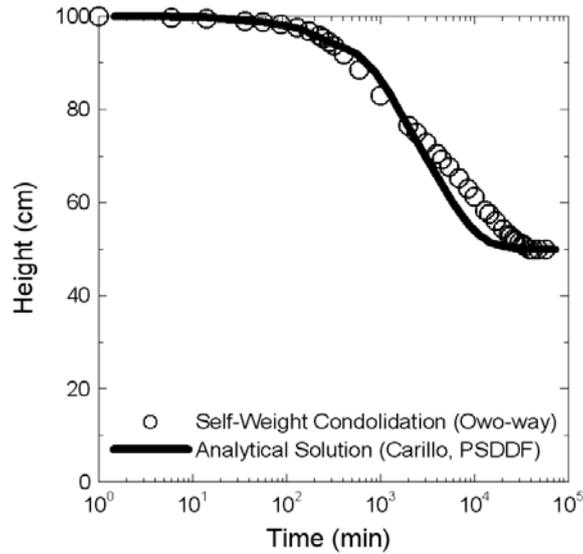


그림 9. 일면배수 자중압밀 시험 결과와 Carillo 이론해 비교 (100cm, PSDDF 해석 적용)

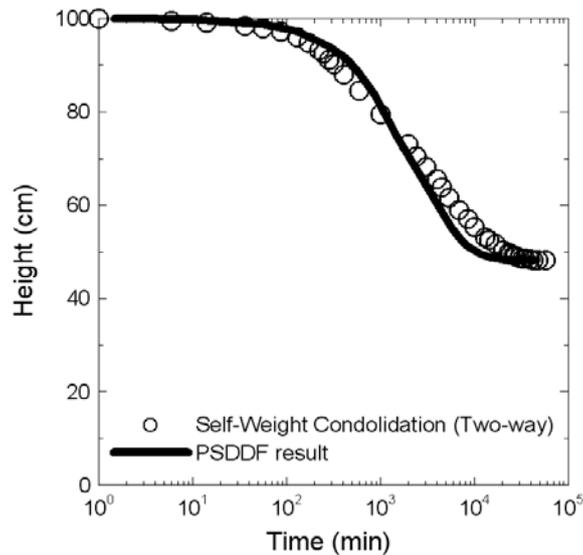


그림 10. 양면배수 자중압밀 시험 결과와 Carillo 이론해 비교 (100cm, PSDDF 해석 적용)

7. 대심도 준설패립 지반에 대한 압밀거동 예측

PSDDF 해석 결과를 적용한 Carillo의 압밀이론해를 이용하여 준설패립된 두께가 10m, 20m인 대심도 준설패립지반 경우에 대한 방사방향을 고려한 자중압밀거동을 예측하였다. 또한, 연직배수재의 설치시기를 준설패립지반의 자중 압밀도가 10%, 30%, 50%, 70%, 90% 일 때로 가정하였다. 그림 11~그림 15는 준설패립지반의 두께가 10m, 20m인 경우에 대해 연직배수재의 설치시기에 따른 준설패립지반의 압밀도 그래프이다. 해석결과를 통하여, 자중압밀 도중에 연직배수재를 타설함으로써 대심도 준설패립지반에서의 자중압밀 시간을 단축시킬 수 있고, 연직배수재의 타설 시점이 빠를수록 연직배수재로 인한 효과가 큰 것을 알 수 있다. 실제 준설패립지반을 개량할 경우 공사기간 등의 이유로 일반적으로 자중압밀이 완료되기 전에 연직배수재를 타설하게 되는데, 연직배수재 타설을 위한 조건이 갖추어질 경우 빠른 시기에 연직배수재를 타설하여 준설패립 지반의 자중압밀시간을 최대한 단축시킬 수 있다.

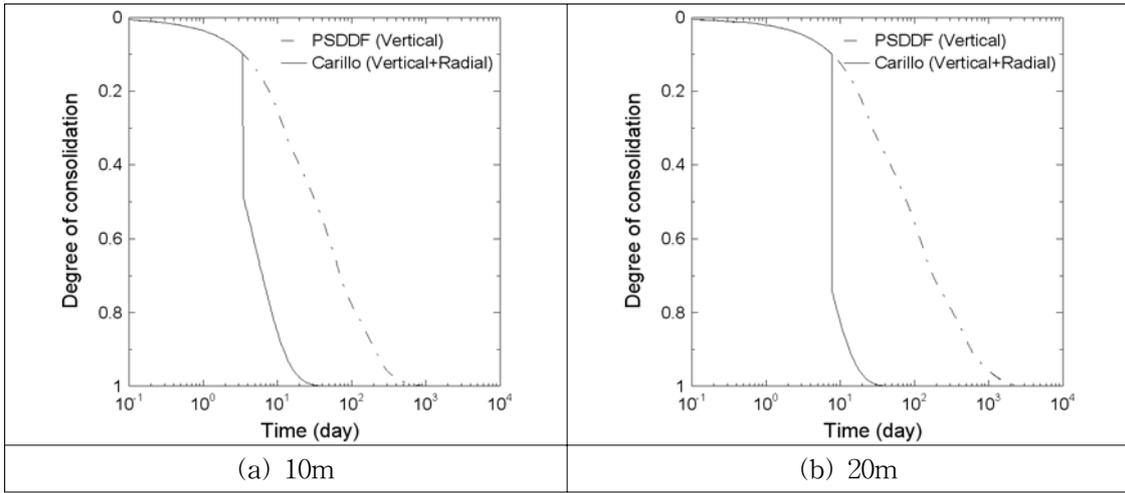


그림 11. 압밀도가 10%일 때 연직배수재 타설된 경우

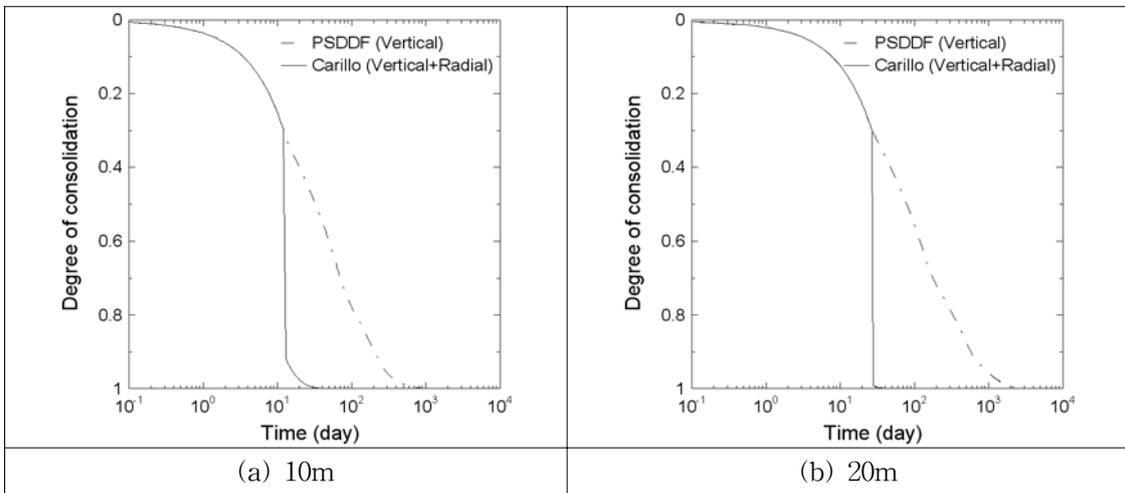


그림 12. 압밀도가 30%일 때 연직배수재 타설된 경우

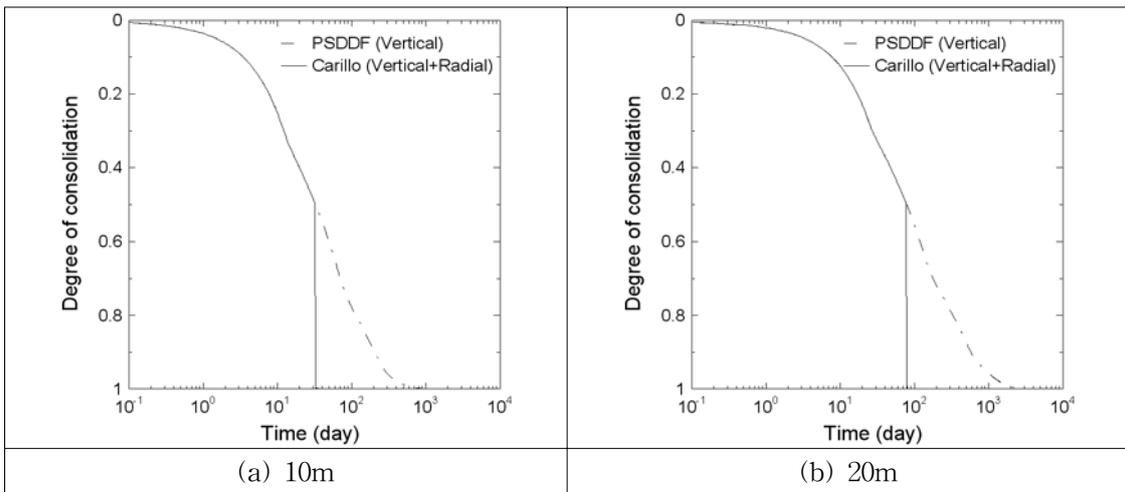


그림 13. 압밀도가 50%일 때 연직배수재 타설된 경우

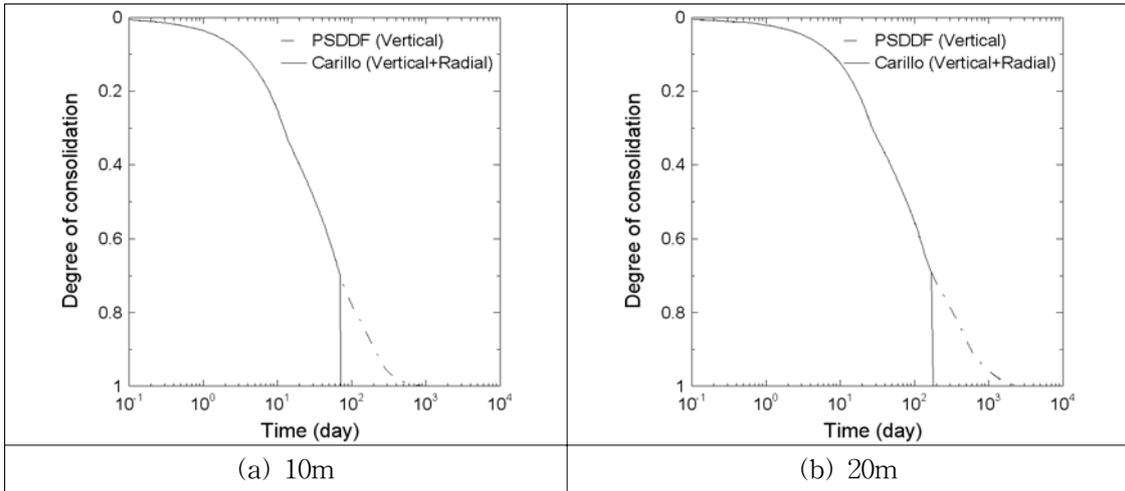


그림 14. 압밀도가 70%일 때 연직배수재 타설된 경우

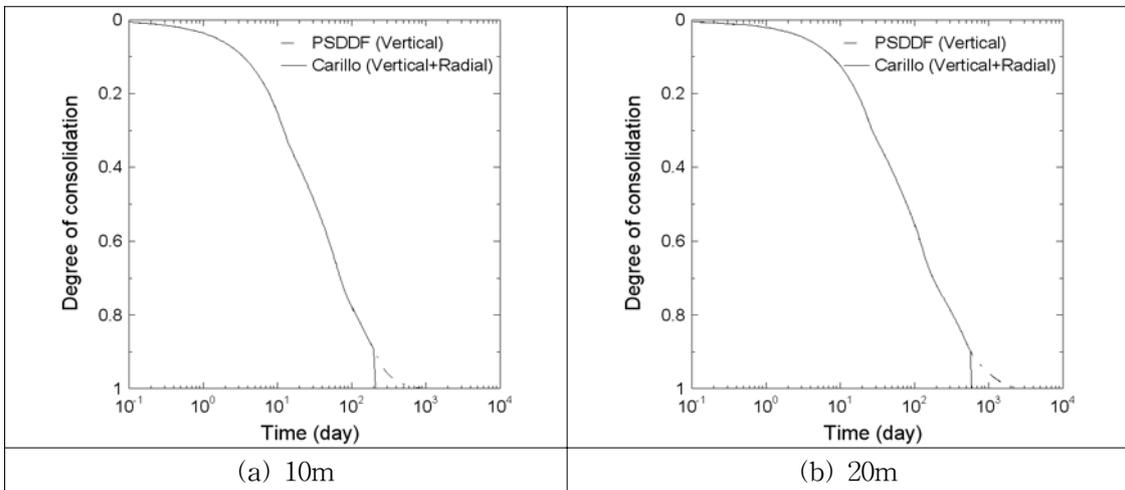


그림 15. 압밀도가 90%일 때 연직배수재 타설된 경우

8. 결론

연직배수재가 설치된 준설패립지반의 자중압밀 거동에 대해 실내 시험 결과와 Morris(2002)와 Barron(1948)의 압밀 이론해 및 PSDDF 해석결과를 적용한 Carillo(1942)의 압밀 이론해와 비교하였다.

1. 평균 압밀도(50%)에서 예측한 유한변형 압밀계수(g)를 적용하여 Morris(2002)의 연직방향 압밀해와 Barron(1948)의 방사방향 압밀해로부터 Carillo(1942)의 압밀해로 예측한 연직배수재가 설치된 지반의 압밀거동과 실내 시험 결과를 비교해 보면, 비슷한 경향을 보이기는 하지만 후반부로 갈수록 압밀속도에서 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

2. 연직배수재를 설치하지 않은 경우보다 연직배수재가 존재하여 방사방향으로의 배수가 동시에 발생할 경우 압밀속도가 현저하게 증가하고 준설패립지반의 두께와 관계없이 방사방향의 시간에 따른 압밀도는 변화가 없다. 준설패립지반의 두께가 5m, 10m로 증가할수록 연직방향 압밀만 고려한 경우 압밀속도는

현저하게 감소하고, 방사방향을 고려한 Carillo(1942)의 이론해 그래프가 방사방향 배수만을 고려한 Barron(1948)의 이론해 그래프로 근접한다. 이는 준설패립지반의 깊이가 깊어질수록 준설패립지반의 압밀거동은 배수거리가 상대적으로 짧은 연직배수재에 의한 방사방향 배수에 의해 지배 받는다.

3. PSDDF 해석 결과로부터 산정한 간극비별 유한변형 압밀계수(g)를 적용한 Barron(1948)의 압밀해와 PSDDF 해석 결과를 적용한 연직방향 압밀도를 이용하여 예측한 Carillo(1942)의 압밀해는 연직배수재를 설치한 실내 시험 결과와 거의 일치하는 경향을 보인다. 이로부터 PSDDF 해석 결과를 이용할 경우 연직배수재를 고려한 준설패립지반의 압밀거동을 보다 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 최항석, 최한영, Stark, T.D. (2006), “준설패립지반의 침하거동 예측을 위한 준설토의 역학적 거동 특성”, *한국지반공학회, 준설패립위원회 학술발표회, 교총회관, 서울, 8월 25일*, pp. 75-86.
2. 최항석, 옥영석, 이철호, 이종선 (2007), “인천지역 준설토의 압밀특성 분석과 현장매립 상태 예측방법 연구”, *준설패립 기술위원회 학술발표회 논문집, 교총회관, 서울, 8월 24일*, pp 95-104
3. Abu-Hejleh, A. N., Znidarcic, D., and Barnes, B. L. (1996). "Consolidation characteristics of phosphatic clays." *Journal of Geotechnical Engineering.*, 122(4). 295-301.
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.*, 146, 54-62.
5. Barron, R. A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol.113, 718-742.
6. Cargill, K. W. (1983). "Prediction of consolidation of very soft soil." *Journal of Geotechnical Engineering.*, 110(6).
7. 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*
8. 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.
9. Carrier, W. D., III, Bromwell, L. G., and Somogyi, F. (1983). "Design capacity of slurried mineral waste ponds." *J. Geotech. Engrg.*, 109(5), 699-716.
10. 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.
11. Imai, G., Tsuruya, K., and Yano, K. (1979). "A treatment of salinity in water content determination of very soft clays." *Soil and Foundations*. 19(3), 84-89.
12. Lee, J. S. (2003) High resolution geophysical techniques for small-scale soil model testing. Ph.D. Thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
13. Monte, J. L., and Krizek, R. J. (1976). "One dimensional mathematical model for large strain consolidation." *Geotechnique*, 26(3), 495-510.

14. 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.
15. 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.
16. 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
17. Stark, T. D., Choi, H, 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
18. You, Z. (1993). "Flow channeling in soft clay and its influence on consolidation." PhD dissertation, Dept. of Civ. Engrg., Univ. of Colorado, Boulder, Colo.
19. 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.