

방사방향 배수를 고려한 초연약 지반의 비선형 유한변형 자중압밀 거동 분석

Non-linear Finite Strain Consolidation of Ultra-soft Soil Formation Considering Radial Drainage

안 용 훈¹ An, Yonghoon

곽 태 훈² Kwak, Taehoon

이 철 호³ Lee, Chulho

최 항 석⁴ Choi, Hangseok

최 은 석⁵ Choi, Eunseok

Abstract

Vertical drains are commonly used to accelerate the consolidation process of soft soils, such as dredged materials, because they additionally provide a radial drainage path in a deep soil deposit. In practice, vertical drains are commonly installed in the process of self-weight consolidation of a dredged soil deposit. The absence of an appropriate analysis tool for this situation makes it substantially difficult to estimate self-weight consolidation behavior considering both vertical and radial drainage. In this paper, a new method has been proposed to take into account both vertical and radial drainage conditions during nonlinear finite strain self-weight consolidation of dredged soil deposits. For 1-D nonlinear finite strain consolidation in the vertical direction, the Morris (2002) theory and the PSDDF analysis are adopted, respectively. On the other hand, to consider the radial drainage, Barron's vertical drain theory (1948) is used. The overall average degree of self-weight consolidation of the dredged soil is estimated using the Carillo formula (1942), in which both vertical and radial drainage are assembled together. A series of large-scale self-weight consolidation experiments being equipped with a vertical drain have been carried out to verify the analysis method proposed in this paper. The results of the new analysis method were generally in agreement with those of the experiments.

요 지

준설매립지반의 압밀을 촉진시키기 위하여 연직방향 뿐만 아니라 방사방향의 배수를 유도하는 연직배수공법이 많이 사용된다. 하지만, 일반적으로 준설된 매립지반의 자중압밀이 완료되기 이전에 연직배수공법이 적용되므로 준설 매립지반의 자중압밀이 진행되는 도중에 연직방향과 방사방향 배수를 동시에 고려하여 압밀거동을 예측하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 비선형 유한변형 자중압밀 과정에서 준설매립지반의 연직방향 및 방사방향을 모두 고려할 수 있는 새로운 해석방법을 제안하였다. 연직방향 비선형 유한변형 자중압밀은 Morris(2002)의 이론해와 PSDDF 해석 결과를 적용하고 방사방향 압밀은 Barron(1948)이 제시한 이론해를 도입하였다. 각 각의 압밀도를 Carillo(1942)의 제안식을 적용하여 연직방향과 방사방향 배수를 고려한 준설매립지반의 자중압밀을 예측하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 해석방법을 검증하기 위해 연직배수재가 설치된 대형자중압밀 시험을 수행한 후 해석결과와 비교하여, 제안한 해석방법이 실험결과를 잘 예측할 수 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Vertical drains, Self-weight consolidation, Time rate consolidation, PSDDF

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

2 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environ & Architect. Engrg., Korea Univ.)

3 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environ & Architect. Engrg., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environ & Architect. Engrg., Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

5 정희원, (주)에스디엔지 이사 (Member, SD Eng.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

항만공사 부지조성이나 항로 혹은 하천 준설매립시 형성되는 초연약 준설매립지반의 시간에 따른 압밀거동의 정확한 예측은 준설매립지반 개량공사에서 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 공사의 특성상 준설매립지반이 단계매립에 의해 조성되기는 하지만, 비교적 두꺼운 준설매립지반의 자중압밀이 완료되기 위해서는 보통 몇 년 이상이 소요된다. 준설토의 자중압밀을 고려한 초연약 준설매립지반의 1차원 비선형 유한변형 압밀거동에 대해서는 현재까지 많은 연구가 이루어져 왔다 (Gibson et al. 1967; Cargill 1982, 1986; Morris 2002, 2007; Stark et al. 2005a, 2005b; 최항석 등 2006, 2007).

준설매립지반 개량공법 중에 하나인 선형압밀공법 적용시, 방사방향의 배수를 추가로 유도하여 두꺼운 준설매립지반의 압밀을 촉진 시키는 연직배수공법을 함께 적용한다. 하지만, 준설매립지반의 자중압밀 완료에는 많은 시간이 소요되므로, 실제 준설매립지반 개량 현장에서는 연직배수재를 준설매립토의 자중압밀이 완료되기 훨씬 이전에 장비를 운전할 수 있는 표층강도만 확보되면 시공하는 것이 일반적이다. 현재까지 연직배수재에 관한 연구내용은 주로 자중압밀이 완료된 준설매립지반에 대한 미소변형이나 비선형 유한변형 압밀 해석에 국한되었다(Rendulic 1935; Carillo 1942; Barron 1948; Yoshikuni 1979; Hansbo 1981; Zeng et al. 1981; Xie 1987; Onoue 1988; Zeng and Xie 1989; Lo 1991; 윤찬영 등 2008).

전술한 이전 연구들의 제한성을 극복하고자 본 연구에서는 비선형 유한변형 자중압밀이 진행되는 도중에 연직배수재가 시공된 조건을 적절히 모사하기 위해 준설매립지반의 연직방향 및 방사방향을 모두 고려할 수 있는 해석방법을 제안하였다. 연직방향의 1차원 비선형 유한변형 자중압밀은 Morris(2002)의 이론해와 PSDDF(Stark et al. 2005a) 해석결과를 적용하였고, 방사방향 압밀은 Barron(1948)이 제시한 이론해를 도입하였다. 각 각의 연직방향과 방사방향의 압밀도를 Carillo (1942)의 제안식을 적용하여 연직배수재가 설치된 준설매립지반의 자중압밀을 예측하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 해석방법을 검증하기 위해 연직배수재가 설치된 대형자중압밀 시험을 수행하고 이를 해석결과와 비교하여, 제안한 방법이 실험결과를 잘 예측할 수 있음을 보였다. 특히, 연직방향 1차원 비선형 유한변형 자중압

밀 거동 예측시, Morris(2002)가 제안한 50% 압밀도를 기준으로 연직방향 압밀계수를 전체 압밀과정 중 고정값으로 단순화시킨 방법에 비하여 PSDDF를 이용하여 각 응력단계에서 비선형성을 정밀하게 고려한 해석방법이 보다 정확한 예측을 하도록 하였다.

2. 비선형 유한변형 압밀이론

압밀이 진행되는 동안 투수계수가 일정하고 미소변형이며, 간극비와 유효응력이 선형 관계라는 가정 하에서 유도된 Terzaghi의 일차원 압밀 이론은 준설매립지반과 같은 압축성이 큰 초연약지반의 압밀거동 예측에는 적합하지 않다. 특히, Terzaghi의 일차원 압밀 이론은 준설매립시 침강이 완료된 후 진행되는 자중압밀 거동을 고려하지 못한다. 준설매립지반 압밀 침하량이 크고 압밀이 진행되는 동안 지반의 투수계수가 응력수준에 따라 감소하며, 간극비와 유효응력의 관계가 비선형이다. 따라서 실제 초연약 준설매립지반의 압밀거동을 예측하기 위해서는 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 관계의 비선형성을 고려한 유한변형 압밀이론의 적용이 필요하다.

Gibson et al.(1967)은 초연약지반의 자중압밀과 비선형 유한변형 압밀거동 예측을 위해 흙 입자와 간극수의 평형방정식, 시간변화에 따른 연속방정식, 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계로부터 다음과 같은 1차원 비선형 편미분 방정식을 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 축소(물질)좌표계(reduced or material coordinate), e 는 간극비, $k(e)$ 는 간극비의 함수로 표현되는 투수계수, γ_s 와 γ_w 는 각각 흙 입자와 간극수의 단위중량, σ' 은 유효응력, t 는 시간이다. 식 (1)을 유도하기 위해 Gibson et al.(1967)은 기존의 Darcy의 법칙을 수정하여 흙 입자와 간극수의 상대속도 개념을 적용한 수정 Darcy의 법칙을 적용하고, 비선형 유한변형 압밀이론식에 다음과 같은 비선형계수 $g(e)$ 와 $\lambda(e)$ 를 도입하였다.

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

$$\lambda(e) = -\frac{d}{de} \left(\frac{de}{d\sigma'} \right) \quad (2)$$

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

$$g(e) = \frac{c_v}{(1+e)^2} \quad (3)$$

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

비선형 편미분 방정식인 식 (1)에 대한 이론적인 해를 직접 구할 수 없기 때문에 비선형 압밀계수 $g(e)$ 와 $\lambda(e)$ 를 상수로 가정하여 식 (1)을 다음 식 (4)과 같이 단순화할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 e}{\partial z^2} + \lambda(\gamma_s - \gamma_w) \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{1}{g} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, λ 는 압축성과 관련된 선형화된 상수, g 는 상수로 표시된 유한변형 압밀계수이다.

Morris(2002)는 식 (4)에 대한 해를 유도하기 위해 50% 압밀 시점의 연직방향 압밀계수를 전체 자중압밀 과정의 압밀계수로 적용하여 단순화 시킨 후, 유한변형 시간계수(T)로 표현되는 압밀도를 일면배수 조건에 대해서는 식 (5)와 같이 제시하고, 양면배수 조건에 대한 식 (6)과 같이 나타냈다.

$$U(T) = 1 - 2\pi^2 N \left(\frac{\left[\exp\left(\frac{N}{2}\right) - \exp\left(-\frac{N}{2}\right) \right] \exp\left(-\frac{N^2 T}{4}\right)}{N + \exp(-N) - 1} \right) \times \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \left(\frac{n^2 \left[\exp\left(-\frac{N}{2}\right) + (-1)^{n+1} \exp\left(-n^2 \pi^2 T\right) \right]}{\left[\left(\frac{N}{2}\right)^2 + (n\pi)^2 \right]^2} \right) \quad (5)$$

$$U(T) = 1 - 2N^2 \left(\frac{\exp\left(\frac{N}{2} - \frac{N^2 T}{4}\right)}{N + \exp(-N) - 1} \right) \times \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \left(\frac{\alpha_n \sin(\alpha_n) \exp(-\alpha_n^2 T)}{\left[\alpha_n^2 + \left(\frac{N}{2}\right)^2 + \frac{N}{2} \right] \left[\alpha_n^2 + \left(\frac{N}{2}\right)^2 \right]} \right) \quad (6)$$

여기서, $N = \lambda l(\gamma_s - \gamma_w)$, $T = \frac{gt}{l^2}$, l 은 흙 입자만의

두께, 푸리에 상수 a_n 은 다음과 같이 표현될 수 있다 (Hildebrand 1949):

$$a_n = \frac{2n\pi(-1)^{n+1} \left[\exp\left(\frac{N}{2}\right) - \exp\left(-\frac{N}{2}\right) \right]}{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + (n\pi)^2}$$

Cargill(1982) 식 (1)을 유한차분식으로 나타내고, 이 유한차분식은 비선형 유한변형률 압밀해석 프로그램인 PSSDDF(Primary consolidation, Secondary compression and Desiccation of Dredged Fill, (Stark 등, 2005))에 적용되었다. PSSDDF는 압축성이 큰 준설매립토의 일차압밀, 이차압밀, 건조수축을 고려할 수 있다. PSSDDF를 적용하기 위해서는 일차압밀, 이차압밀, 건조수축에 대한 입력치가 필요하고, 그 중 일차압밀과 관련이 있는 준설매립토의 초기 간극비, 간극비-유효응력 관계, 간극비-투수계수 관계가 적절한 실험을 통해 결정되어야 한다.

3. 방사방향 압밀을 고려한 압밀이론 해석

3.1 Barron의 방사방향 압밀 이론

Barron(1948)은 방사방향 압밀에 대한 가장 포괄적인 해법을 제시하였는데, 연직배수재로 인한 방사방향 압밀에 대해 자유변형 가정에 기초한 이론 해와 균등변형가정에 기초한 근사 해를 제시하였고, 자유변형과 균등변형으로부터 산정된 예상 과잉간극수압의 차이가 거의 없음을 보였다. 균등변형 압밀조건으로부터 Barron(1948)이 제시한 방사방향 압밀 이론해는 식 (7)과 같다.

$$\bar{U}_h = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F(n)}\right) \quad (7)$$

여기서, T_h 는 방사방향 압밀에 대한 시간계수 $\left(T_h = \frac{c_h t}{4R^2}\right)$, R 은 연직배수재의 유효반경, 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 준설점토가 층상구조를 갖지 않고 균등하게 분포한다고 보고, 연직방향 압밀계수(c_v)와 방사방향 압밀계수(c_h)가 동일하다고 가정하였다.

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 (8)과 같이 제안되었다.

$$1 - U = (1 - U_v)(1 - U_r) \quad (8)$$

여기서, U 는 임의의 시간에서 점토층의 평균압밀도, U_v 는 임의의 시간에서 연직방향 평균압밀도, U_r 는 임의의 시간에서 방사방향 평균압밀도를 의미한다. 본 논문에서는 Morris(2002)의 압밀이론해와 PSSDF 해석결과를 연직방향 평균압밀도로, Barron(1948)의 압밀이론해를 방사방향 평균압밀도로 적용하여 연직방향과 방사

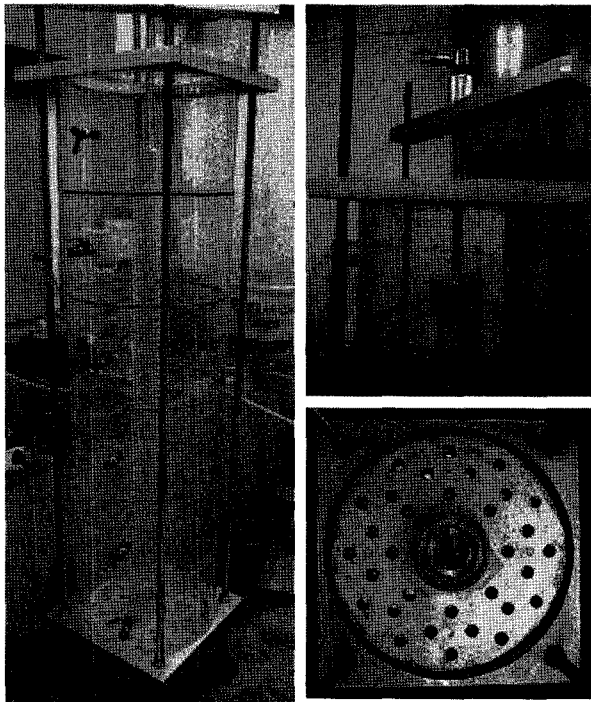


그림 1. 연직배수재를 고려한 대형자중압밀 시험 장비

방향 흐름을 동시에 고려한 비선형 유한변형 압밀거동을 검토하였다.

4. 연직배수재를 고려한 자중압밀 시험

4.1 대형자중압밀 시험장치

방사방향을 고려한 자중압밀 거동분석을 위하여 100cm 높이의 대형자중압밀 시험장비를 고안하였다(그림 1). 대형자중압밀 시험장비는 지름 30cm, 높이 20cm 규격을 갖는 5개의 원통형 투명 아크릴 셀을 결합하여 자중압밀이 진행되는 동안 외부에서 계면고 변화를 확인할 수 있다. 각 아크릴 셀 사이에는 오링을 삽입하여 자중압밀이 진행되는 동안 아크릴 셀 사이에서 발생할 수 있는 점토 슬러리의 유출을 방지하였다. 또한, 각 아크릴 셀에는 자중압밀이 진행되는 동안 시간에 따른 깊이 별 간극수압을 측정할 수 있는 간극수압계 설치용 벨브가 설치되어 있다. 대형자중압밀 시험장비의 하부판은 하방향으로 배수조건을 모사할 수 있도록 다수의 배수구를 형성하였다. 하부판의 배수구는 벨브와 연결되어 있어 하부판에서의 배수 및 비배수 조건을 조절할 수 있다. 즉, 하부로의 배수 시, 양면배수 자중압밀 조건을, 하부 비배수 시, 일면배수 자중압밀 조건을 모사할 수 있다. 원통형 아크릴 셀 중심에 연직배수재 역할을 하는 원통형 아크릴을 고정할 수 있는 고정 장치가 존재하며 연직배수재를 통한 배수를 가능하게 하기 위하여 고정 장치에도 하부에 배수구를 설치하였다. 방사방향 배수량과 연직방향 배수량을 비교하기 위하여 하부 연직배수재 고정장치와 하부판의 배수구는 독립된 벨브로 연결되어 있다. 연직배수재 역할을 하는 지름 6cm의 원통형 아크릴에는 하부판과 마찬가지로 다수의 배수구가 존재하며, 자중압밀이 진행되는 동안 점토 슬러리가 배

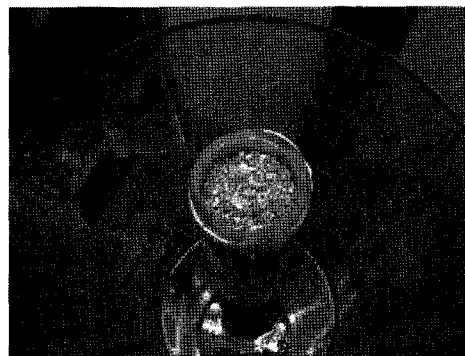


그림 2. 연직배수재 역할을 하는 원통형 아크릴

수구를 통과하는 것을 막기 위하여 원통형 아크릴 외부는 여과지를 부착하였다. 그리고 원통형 아크릴 내부는 투수계수가 충분히 큰 모래를 채워, 준설패립지반에서 사용되는 연직배수재를 모사하였다.

그림 2는 대형자중압밀 시험에서 연직배수재를 모사하는 원통형 아크릴 기동을 보여준다.

4.2 시료 및 자중압밀 시험결과

본 연구에서 시료의 균질성을 확보하기 위해 카올리나이트를 사용하여 준설패립지반 거동을 모사하였다. 카올리나이트 시료에 대한 기본 물성 시험은 비중 시험, 액·소성 시험, 입도 시험을 실시하여 통일분류상 압축성이 큰 점토(CH)로 시료를 분류하였고, 그 결과를 표 1에 정리했다.

표 2는 카올리나이트에 대한 XRD 분석결과를 보여준다. 본 논문에서 사용된 카올리나이트시료의 순도는 90.3%이고, 깁사이트(Gibbsite)와 석영(Quartz)등의 불순

물이 소량 포함되어 있다.

그림 3은 카올리나이트의 XRD 분석결과를 보여주는 그래프이다.

카올리나이트 시료를 배합하여 침강 및 자중압밀 시험을 통해서 산정하게 되는 초기 간극비(e_{00} ; void ratio at zero effective stress)는 침강압밀이 끝나고 자중압밀이 시작되는 시점에서 시료의 간극비를 의미한다. 초기 간극비는 침강과정과 압밀과정 사이의 경계면에 해당하는 상태를 의미하며, 이는 시료 입자들이 서로 접촉하기 시작하여 입자간의 응력이 전이되는 순간의 간극비로 정의할 수 있다(Stark et al. 2005; 최항석 등 2006). 자중압밀이 완료된 시점에서 시료 상부의 부유물과 상층액을 제거한 뒤 시료 표면의 함수비를 측정하는 시료 표면 채취법을 이용하여 산정한 카올리나이트의 초기 간극비는 7.3이었다. 또한 카올리나이트 시료의 간극비-유효응력, 간극비-투수계수관계를 파악하기 위하여 최항석 등 (2006)이 제시한 자중압밀시험 및 CRS 압밀시험을 실시하였고, 그 결과는 그림 4, 그림 5와 같다.

표 1. 카올리나이트 시료의 기본 물성치

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

표 2. XRD 분석결과

시료	조성비(%)				
	Kaolin Minerals	Gibbsite	Quartz	Illite	Montmorillonite
카올리나이트	90.3	6.7	2.9	미량	미량

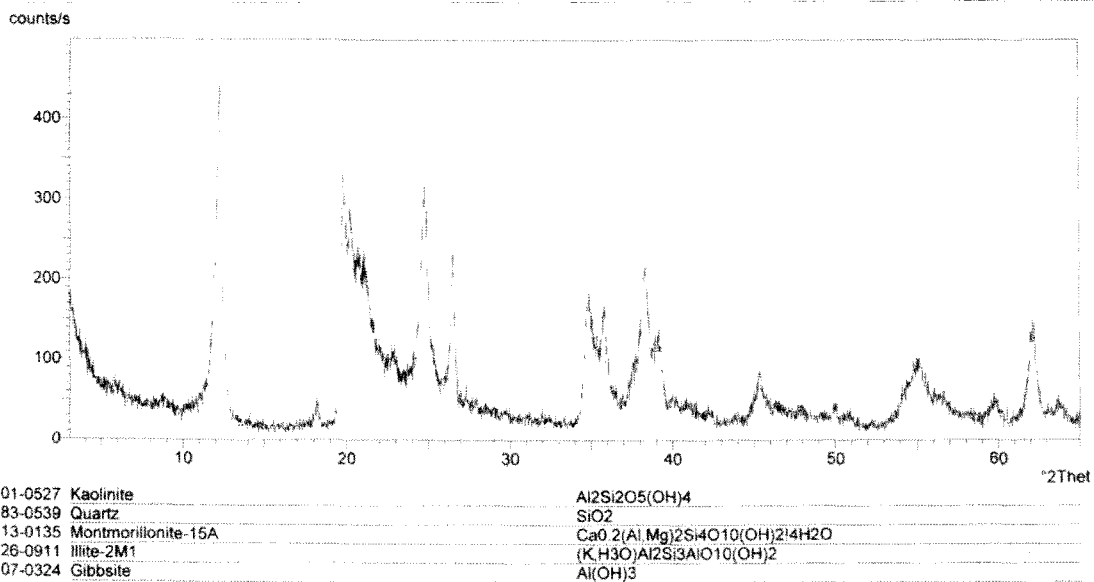


그림 3. 카올리나이트 시료의 XRD 분석결과 그래프

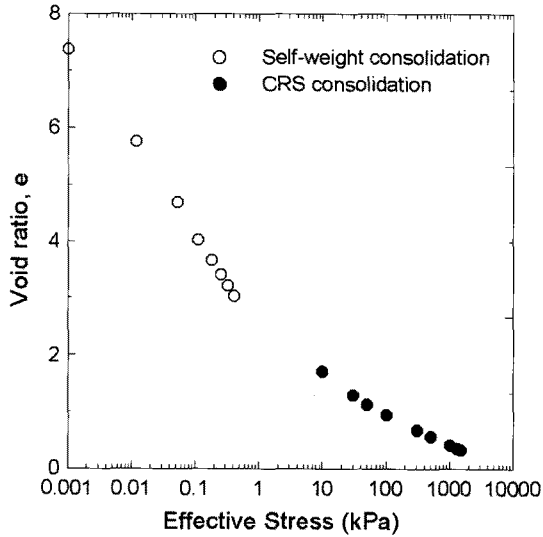


그림 4. 간극비-유효응력 관계(자중압밀 및 CRS 압밀)

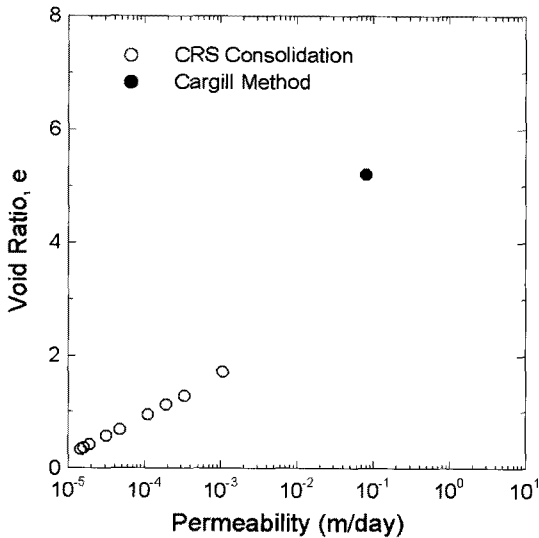


그림 5. 간극비-투수계수 관계(자중압밀 및 CRS 압밀)

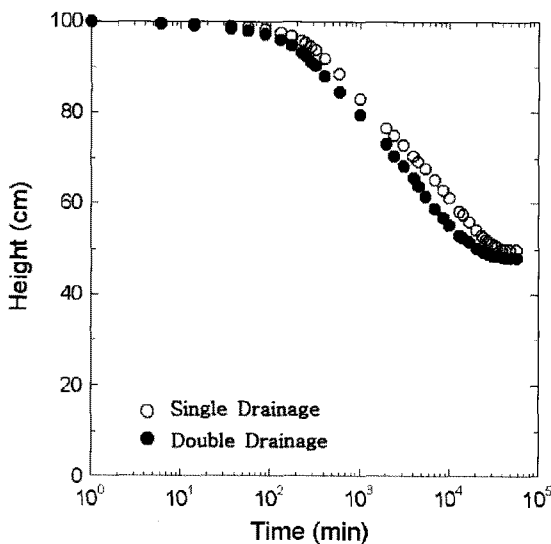


그림 6. 시간에 따른 계면고 변화(시료높이 100cm, 연직배수재 포함)

대형자중압밀 시험 장비를 이용하여 연직배수재가 설치된 준설패립지반의 압밀거동을 모사한 시험 결과는 다음의 그림 6과 같다. 그림 6은 일면 및 양면배수 조건에서 시간에 따른 계면고 변화를 보여준다.

시간에 따른 계면고 변화를 보면, 양면배수 조건이 일면배수 조건에 비하여 자중압밀속도가 빠른 것을 알 수 있다. 일면 및 양면배수 조건에서의 자중압밀 시험 결과는 점토 슬러리의 초기 배합 함수비가 동일함에도 불구하고 최종 압밀침하량에서 차이를 보이는데, 이는 일면배수 조건에서와는 달리 양면배수 조건에서의 하방향 배수로 인해 점토 슬러리 내부에서 침투수력이 추가로 발생하여 두 조건에서의 압밀침하량의 차이를 야기한 것으로 보인다.

5. Morris 이론해와 방사방향 압밀을 고려한 해석

카올리나이트 시료에 대한 연직배수재가 삽입된 대형자중압밀 시험 결과와 본 논문에서 제안한 방법(연직방향 비선형 유한변형 자중압밀에 대한 Morris (2002)의 이론해와 방사방향 압밀에 대한 Barron(1948)이 제시한 이론해를 Carillo(1942)가 제안한 이론식 (8)로 결합한 방법)을 이용한 해석결과를 비교하였다. 방사방향 압밀 해석을 위해서 필요한 연직배수재의 직경과 점토층의 유효직경은 연직배수재가 삽입된 카올리나이트 시료에 대한 대형자중압밀 시험에 사용된 연직배수재의 제원을 사용하였다.

그림 7과 그림 8은 준설패립지반의 두께가 1m인 경우에 대한 본 논문에서 제안한 Carillo(1942)의 이론식을 적용한 해석방법으로 해석한 결과와 일면 및 양면배수조건으로 수행한 대형자중압밀 시험결과를 비교한 그래프이다. 해석결과와 시험결과가 일면배수 및 양면배수 모두 완전하게 일치하지는 않았으나 전반적으로 유사한 경향을 보임을 알 수 있다. 특히, 자중압밀 후반부에서는 Carillo (1942)의 이론식을 적용한 해석결과가 시험결과 보다 자중압밀 속도가 다소 증가하는 경향을 보이는데, 이는 연직방향의 자중압밀 거동을 Morris (2002)의 이론해로 나타낼 때, 50% 압밀 시점의 연직방향 압밀계수를 전체 자중압밀 단계의 압밀계수로 단순화하여 적용하였기 때문으로 유추할 수 있다. 이는 다음 6장에 제시된 연직방향의 자중압밀을 PSSDDF 해석결과를 이용하여 각 응력단계 마다 비선형성을 정밀하게 고려하여 개선된 결과와 비교할 수 있다.

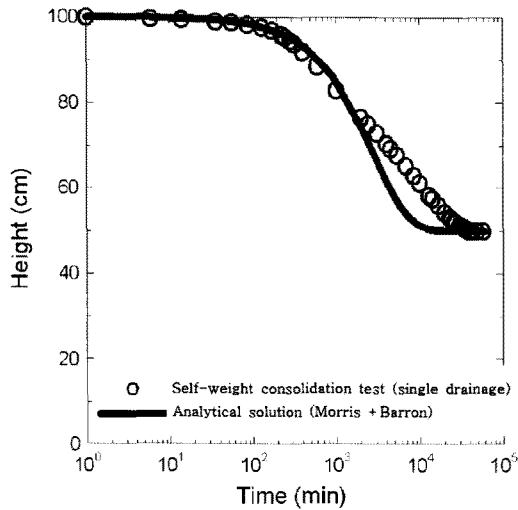


그림 7. 일면배수 자중압밀 시험 결과와 Carillo 이론해를 적용한 해석 결과 비교(시료높이 100cm, Morris(2002) 이론식 적용)

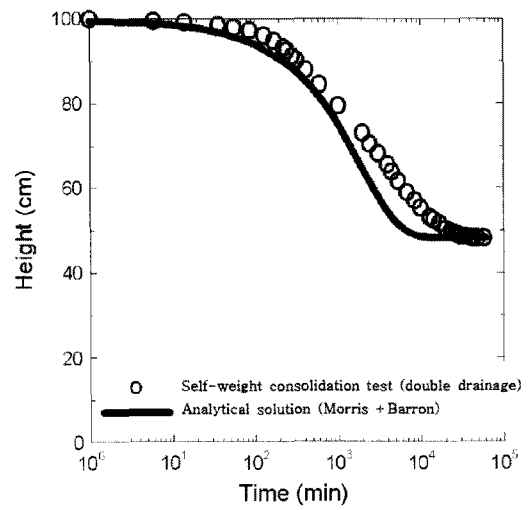
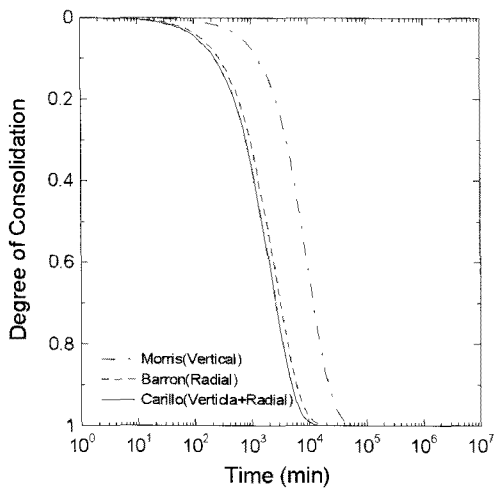
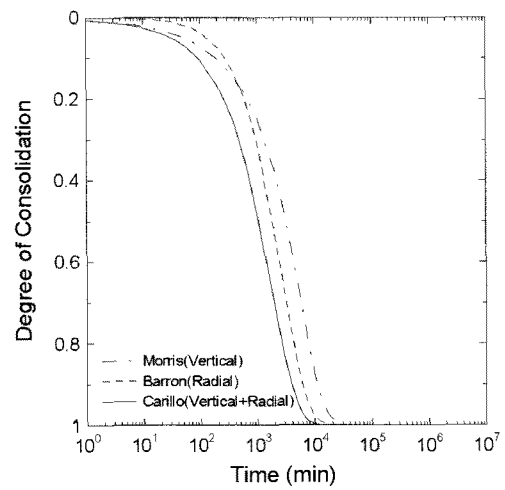


그림 8. 양면배수 자중압밀 시험 결과와 Carillo 이론해 적용한 해석 결과 비교(시료높이 100cm, Morris(2002) 이론식 적용)

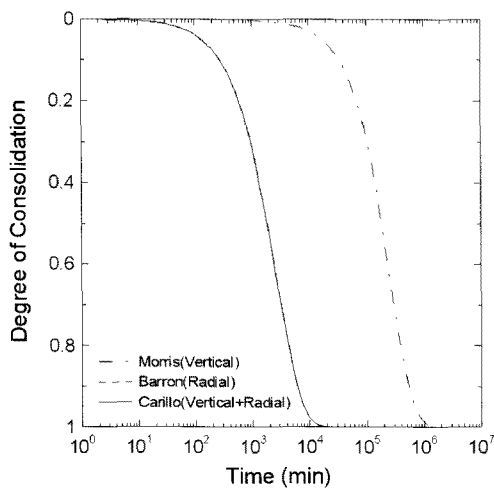


(a) 일면배수 조건

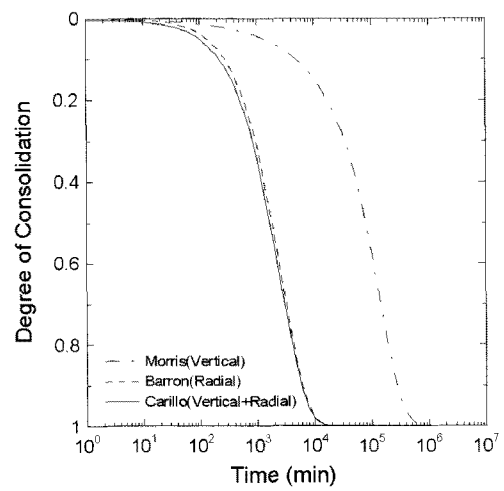


(b) 양면배수 조건

그림 9. Carillo 이론해를 적용한 해석방법으로 산정한 압밀도(매립지반 두께 1m)

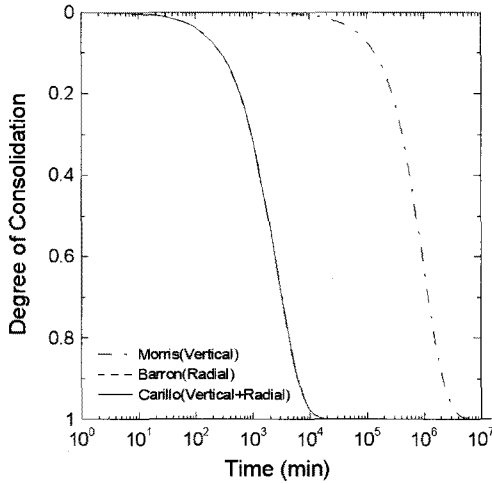


(a) 일면배수 조건

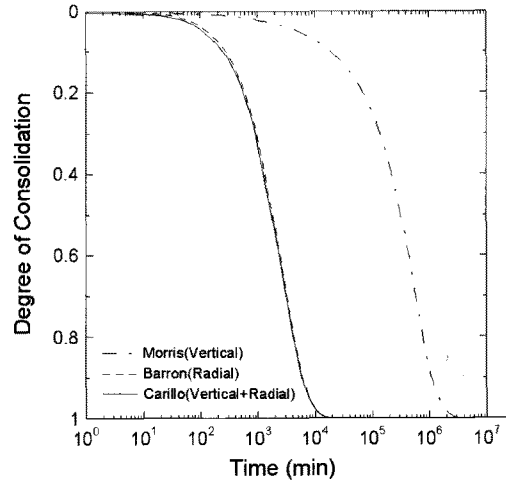


(b) 양면배수 조건

그림 10. Carillo 이론해를 적용한 해석방법으로 산정한 압밀도(매립지반 두께 5m)



(a) 일면배수 조건



(b) 양면배수 조건

그림 11. Carillo 이론해를 적용한 해석방법으로 산정한 압밀도(매립지반 두께 10m)

1m 이상의 두께를 갖는 현장 준설매립 지반에서의 방사방향을 고려한 자중압밀 거동을 예측하기 위하여 준설매립 지반의 두께를 5m, 10m로 가정하여 본 논문에서 제안한 Carillo(1942)의 이론해를 적용한 해석방법으로 압밀도를 산정하였다. 그림 9에서 그림 11은 각각 준설매립지반의 두께가 1m, 5m, 10m인 경우 시간에 따른 압밀도를 나타낸다. 각 경우에서, 연직배수재를 설치하지 않은 경우보다 연직배수재가 존재하여 방사방향으로의 배수가 동시에 발생할 경우 압밀속도가 현저하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 준설매립지반의 두께가 5m, 10m로 증가할수록 방사방향 배수 영향이 커짐을 확인할 수 있다. 또한, 매립지반의 두께가 증가할수록 연직방향과 방사방향 압밀을 고려하기 위해 본 논문

에서 제안한 Carillo(1942) 이론해를 적용한 해석결과가 방사방향 배수만을 고려한 Barron(1948)의 이론해로 근접하는 것을 볼 수 있다. 이는 준설매립지반의 두께가 두꺼워질수록 준설매립지반의 압밀거동은 연직배수재에 의한 방사방향 배수에 의해 지배받음을 알 수 있다.

6. PSDDF 해석결과와 방사방향 압밀을 고려한 해석

Morris(2002)가 제안한 자중압밀 이론해에서는 50% 압밀 시점의 유한변형 압밀계수를 전체 자중압밀 과정에 유한변형 압밀계수로 적용함으로써 전체 평균 압밀도 산정에 오차가 발생할 수 있다. 이 오차를 감소시키기 위하여 연직방향을 자중압밀을 PSDDF 해석결과를 이

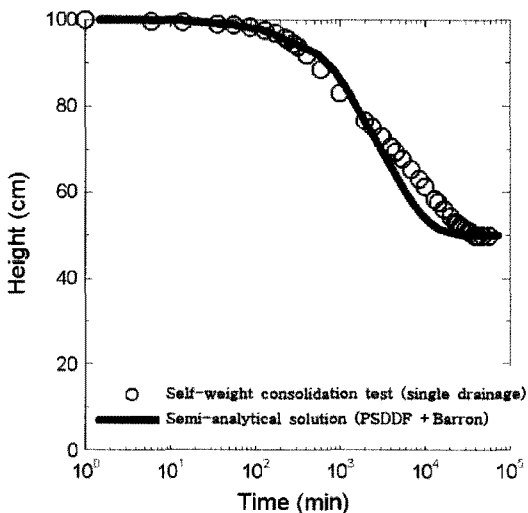


그림 12. 일면배수 자중압밀 시험 결과와 Carillo 이론해를 적용한 해석결과 비교(시료높이 100cm, PSDDF 해석결과 적용)

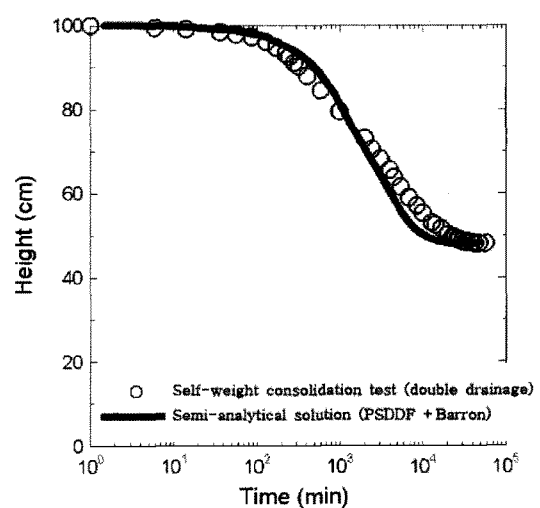


그림 13. 양면배수 자중압밀 시험 결과와 Carillo 이론해를 적용한 해석결과 비교(시료높이 100cm, PSDDF 해석결과 적용)

용하여 각 응력단계마다 비선형성을 정밀하게 고려하는 해석방법을 제안하였다. PSSDF 해석을 위한 입력 데이터는 4장에서 제시한 카올리나이트의 초기간극비 ($e_{00}=7.30$), 간극비-유효응력 관계(그림 4) 및 간극비-투수계수 관계(그림 5)를 적용하였다. PSSDF 해석에서는 유한변형 압밀계수(g)를 산정할 수 있는 $\frac{k}{1+e}$ 와 $\frac{d\sigma'}{de}$ 값이 각 압밀단계에서의 간극비 따라 계산된다. 즉, 각 압밀단계별로 변화하는 간극비 대한 유한변형 압밀계수를 산정하여 방사방향 압밀 이론해인 Barron의 이론해와 식 (8)를 이용하여 평균 압밀도를 구한다. 그림 12와 그림 13은 연직방향 압밀을 PSSDF 해석결과를 이용하여 본 논문에서 제안한 Carillo 이론해를 적용한 해석

방법 결과와 대형자중압밀 시험결과와의 비교를 보여준다. 그림 12와 그림 13은 연직방향 압밀도를 Morris(2002)의 선형화된 압밀해를 적용한 경우(그림 7과 8) 보다, PSSDF 해석결과를 적용한 경우가 대형자중압밀 시험결과에 더 근접함을 보여준다. 이는 PSSDF 해석 결과로부터 간극비에 따른 유한변형 압밀계수(g)를 적용할 경우, 실제 연직배수재가 설치된 준설매립지반의 압밀 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

7. 도심도 준설매립 지반에 대한 압밀거동 예측

연직방향 압밀거동을 PSSDF 해석으로 구한 Carillo

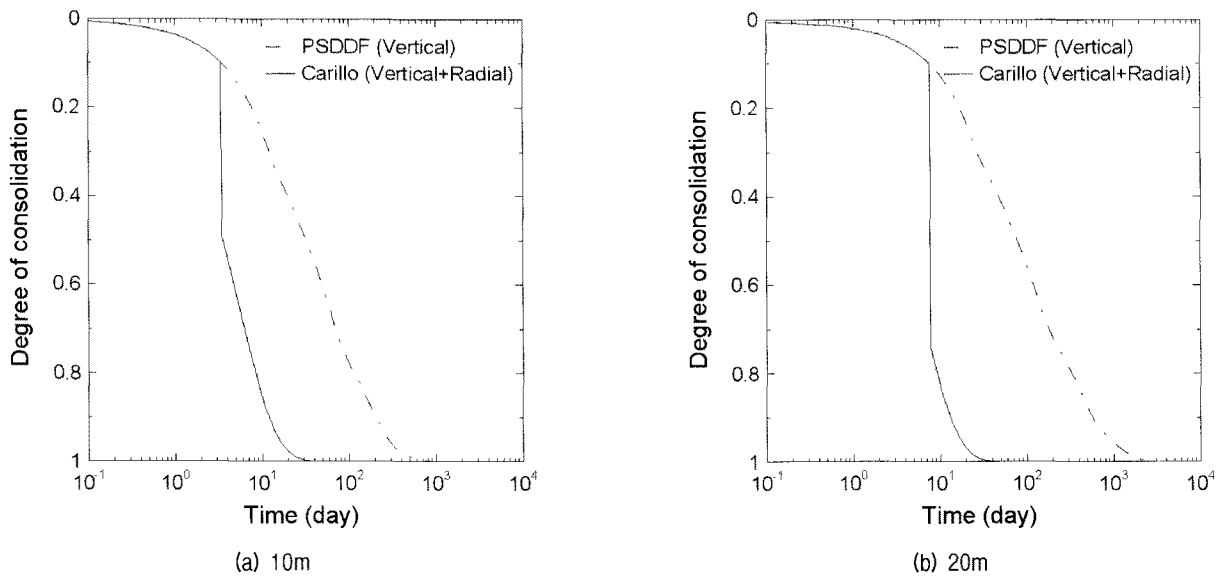


그림 14. 압밀도가 10%일 때 연직배수재 타설된 경우

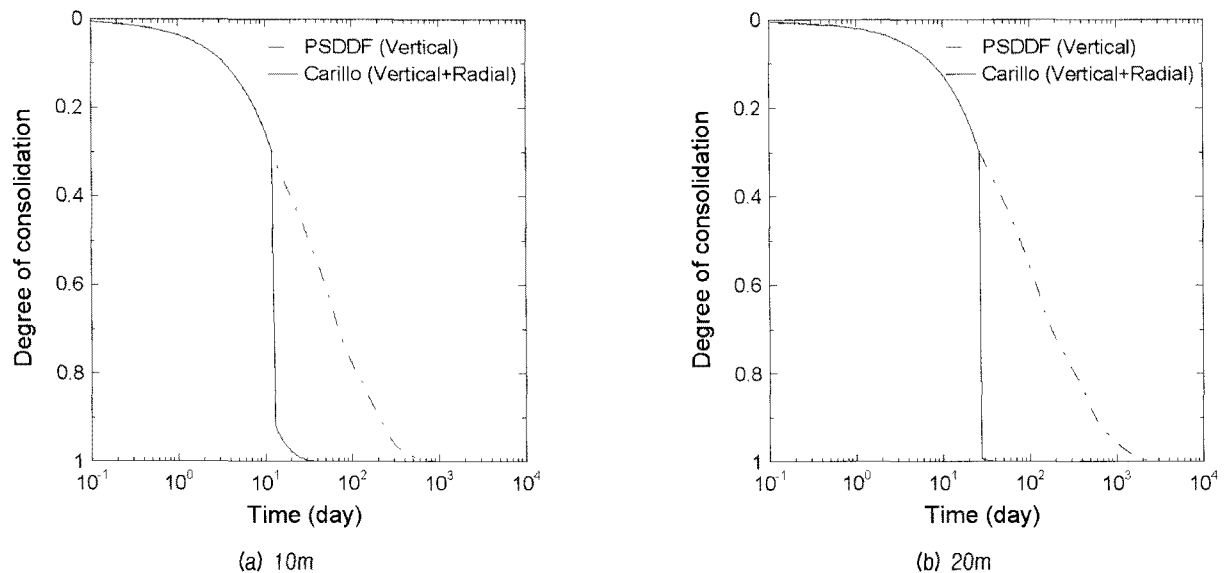
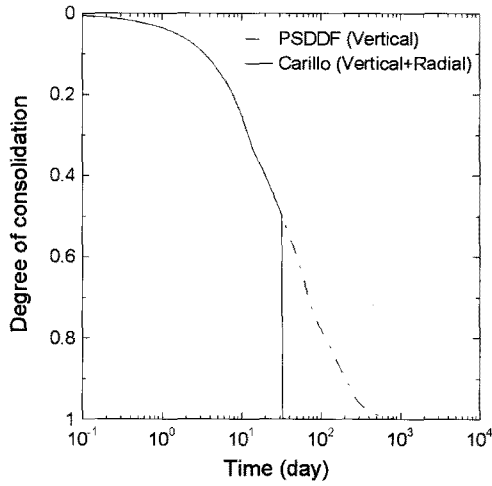
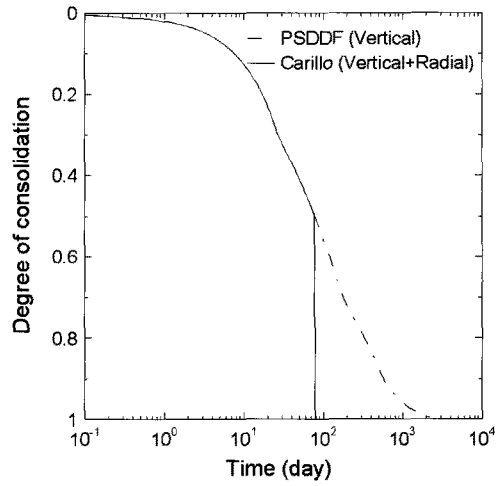


그림 15. 압밀도가 30%일 때 연직배수재 타설된 경우

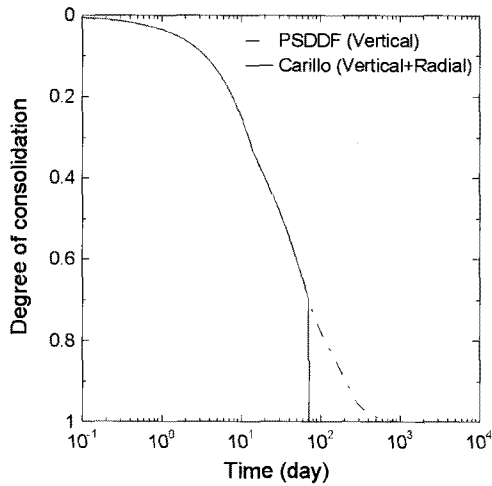


(a) 10m

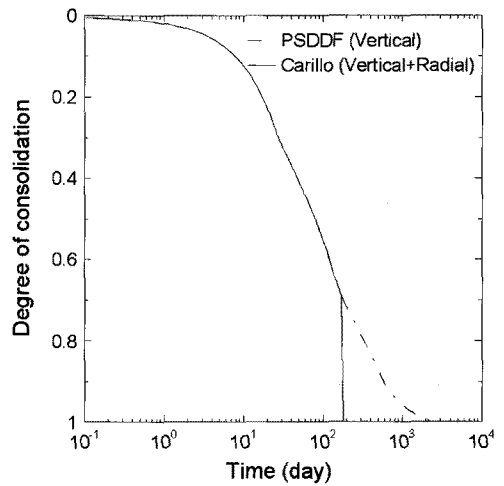


(b) 20m

그림 16. 압밀도가 50%일 때 연직배수재 타설된 경우

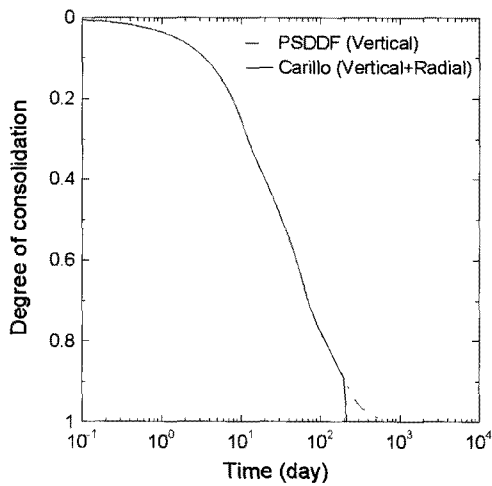


(a) 10m

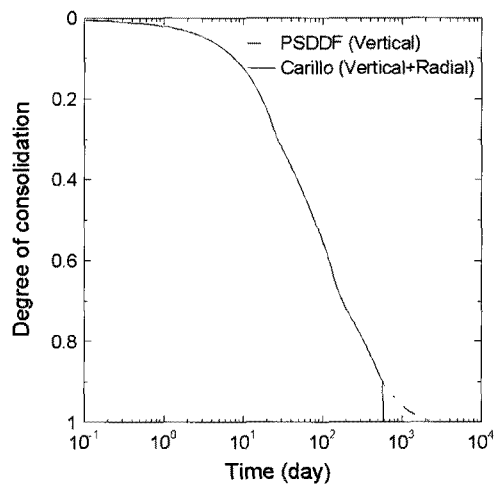


(b) 20m

그림 17. 압밀도가 70%일 때 연직배수재 타설된 경우



(a) 10m



(b) 20m

그림 18. 압밀도가 90%일 때 연직배수재 타설된 경우

이론해를 적용한 해석방법 적용하여 두께가 10m, 20m 인 대심도 준설매립지반에 대해 방사방향을 고려한 자중압밀거동을 예측하였다. 연직배수재의 설치시기를 준설매립지반의 자중 압밀도가 10%, 30%, 50%, 70%, 90% 인 경우를 적용하여 실제 현장에서 준설매립지반의 자중압밀이 진행되는 도중에 연직배수재가 설치되는 조건을 모사하였다. 그림 14에서 그림 18은 준설매립지반의 두께가 10m, 20m인 경우에 대해 연직배수재의 설치시기에 따른 준설매립지반의 시간에 따른 압밀도를 보여준다. 해석결과를 통하여, 자중압밀 도중에 연직배수재를 타설함으로써 대심도 준설매립지반에서의 자중압밀 시간을 상당히 단축시킬 수 있고, 연직배수재의 타설 시점이 빠를수록 연직배수재로 인한 효과가 큰 것을 알 수 있다. 실제 준설매립지반을 개량할 경우, 일반적으로 자중압밀이 완료되기 전에 연직배수재를 설치하게 되는데, 연직배수재 설치를 위한 조건(즉, 충분한 표층처리가 완료되어 장비를 운행할 수 있는 조건)이 갖추어질 경우 빠른 시기에 연직배수재를 타설하면 준설매립지반의 자중압밀시간을 최대한 단축시킬 수 있다. 본 연구에서 제시한 해석방법을 적용할 경우, 초연약 준설매립지반의 자중압밀이 완료되기 이전에 연직배수재가 설치될 경우의 압밀도를 적절하게 평가할 수 있음을 알 수 있다.

8. 결 론

연직배수재가 설치된 준설매립지반의 자중압밀 거동에 대해 실내 시험결과, 이론해 적용 및 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Morris(2002)와 Barron(1948)이 제시한 각각의 이론해를 Carillo(1942)가 제안식으로 결합하여 본 논문에서 제안한 해석방법은 연직배수재가 설치된 대형 자중압밀 시험결과와 전반적인 경향은 유사하지만, 자중압밀 후반부에서 해석결과가 시험결과 보다 자중압밀 속도가 다소 증가하는 경향을 보이는데, 이는 연직방향의 자중압밀 거동을 Morris(2002)의 이론해로 나타낼 때, 50% 압밀 시점의 연직방향 압밀계수를 전체 자중압밀 단계의 압밀계수로 단순화하여 적용하였기 때문으로 유추할 수 있다.
- (2) 준설매립지반의 두께가 증가할수록 본 논문에서 제안한 Carillo(1942) 이론해를 적용한 해석결과가 방

사방향 배수만을 고려한 Barron (1948)의 이론해로 근접하는 것을 볼 수 있다. 이는 준설매립지반의 두께가 두꺼워질수록 준설매립지반의 압밀거동은 연직배수재에 의한 방사방향 배수에 의해 지배받을 수 있다.

- (3) 연직방향 압밀을 PSDDF 해석결과를 이용하여 본 논문에서 제안한 Carillo 이론해를 적용한 해석방법이 연직방향 압밀률 Morris(2002)의 선형화된 압밀해를 적용한 경우 보다, 대형자중압밀 시험결과에 더 근접함을 보여준다. 이는 PSDDF 해석 결과로부터 압밀 도중 변화하는 간극비에 따른 유한변형 압밀계수(g)를 단계별로 계산한 값을 적용하였기 때문이다.
- (4) 본 연구에서 제시한 해석방법을 적용할 경우, 대심도 초연약 준설매립지반의 자중압밀이 완료되기 이전에 연직배수재가 설치될 경우의 연직방향과 방사 방향을 동시에 고려한 평균 압밀도를 적절하게 평가할 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 본 논문의 결론은 실내시험에서 조성된 균질한 카올리나이트 시료에 대한 침강 및 자중압밀 시험결과를 바탕으로 얻어진 것이므로, 실제 준설토가 매립될 때 발생할 수 있는 입도분리 현상에 의해 비균질화된 준설매립지반이 조성될 경우에는 본 논문에서 제안하는 방법을 적용시, 주의를 기울여야 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(09기술혁신E06)에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 윤찬영, 조경진, 정충기 (2008) “다층지반 및 스미어 경계면 해석을 위한 유한차분 압밀해석 기법” 대한토목학회 논문집, 제28호, 5권, pp.283-292.
2. 최항석, 최한영, Stark, T.D. (2006), “준설매립지반의 침하거동 예측을 위한 준설토의 역학적 거동 특성”, 한국지반공학회, 준설매립위원회 학술발표회, 교총회관, 서울, 8월 25일, pp.75-86.
3. 최항석, 옥영석, 이철호, 이종선 (2007), “인천지역 준설토의 압밀특성 분석과 현장매립 상태 예측방법 연구”, 준설매립 기술위원회 학술발표회 논문집, 교총회관, 서울, 8월 24일, pp.95-104.
4. Barron, R. A. (1948), “Consolidation of fine-grained soils by drain wells”, *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol.113, pp.718-742.

5. Cargill, K.W. (1982), "Consolidation of Soft Layers by Finite Strain Analysis." Miscellaneous Paper GL-82-3, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
6. 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.
7. Carillo, N. (1942), "Simple Two and Three Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils", *Journal of Mathematics and Physics*, Vol.21, No.1, pp.1-5.
8. 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.
9. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains," *Proc., 10th ICSMFE, Stockholm*, Vol.3, pp. 677-682.
10. Hindebrand, F. B. (1949), *Advanced calculus for engineers*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
11. Lo, D. O. K. (1991) "Soil Improvement by Vertical Drains", Ph.D. thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
12. 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.
13. 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*, ASCE, Vol.133, No.4, pp.305-308.
14. Onoue, A. (1988), "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration," *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.
15. Rendulic, L. (1935). "Der Hydrodynamische Spannungsausgleich in Zentral Entwässerten Tonzylindern." *Wasserwirtsch. U. Tech.*, Vol.2.
16. 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.
17. 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.
18. Xie, K. H. (1987), "Sand-Drained Ground: Analytical and Numerical Solutions and Optimal Design," Dissertation, Zhijiang University, Hangzhou.
19. Yoshikuni, H. (1979), "Design and Construction Control of Vertical Drain Methods," Gihodo, Tokyo, Foundation Engineering Series, Dissertation, Hiroshima University.
20. Zeng, G. X. and Xie, K. H. (1989), "New Development of the Vertical Drain Theories", *Proc., 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, Vol.2, pp.1435-1438.

(접수일자 2010. 4. 26, 심사완료일 2010. 10. 27)