

초연약 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀해석기법 Part I: 해석 물성치 평가

Analysis Method for Non-Linear Finite Strain Consolidation for Soft Dredged Soil Deposit Part I: Parameter Estimation for Analysis

곽 태 훈¹ Kwak, Tae-Hoon 이 철 호² Lee, Chul-Ho
임 지 희³ Lim, Jee-Hee 안 용 훈⁴ An, Yong-Hoon
최 항 석⁵ Choi, Hang-Seok

Abstract

The renowned Terzaghi's one-dimensional consolidation theory is not applicable to quantification of time-rate settlement for highly deformable soft clays such as dredged soil deposits. To deal with this special condition, a non-linear finite strain consolidation theory should be adopted to predict the settlement of dredged soil deposits including self-weight and surcharge-induced consolidation. It is of importance to determine the zero effective stress void ratio (e_{00}), which is the void ratio at effective stress equal to zero, and the relationships of void ratio-effective stress and of void ratio-hydraulic conductivity for characterizing non-linear finite strain consolidation behavior for deformable dredged soil deposits. The zero effective stress void ratio means a transitional status from sedimentation to self-weight consolidation of dredged soils. In this paper, laboratory procedures and equipments are introduced to measure such key parameters in the non-linear finite strain consolidation analysis. In addition, the non-linear finite strain consolidation parameters of the Incheon clay and kaolinite are evaluated with the aid of the proposed methods in this paper, which will be used as input parameters for the non-linear finite strain consolidation analyses being performed in the companion paper.

요 지

Terzaghi의 1차원 압밀이론은 준설 매립지반과 같이 고함수비, 고압축성을 갖는 점토지반의 압밀해석에는 적합하지 않다. 준설 매립지반의 자중압밀과 재하하중에 의한 추가압밀을 적절히 고려하기 위해서는 비선형, 유한변형 압밀이론을 도입해야 한다. 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀해석을 수행하기 위해서는 침강과정이 종료되고 자중압밀이 시작되는 시점의 간극비인 초기간극비(e_{00})와 비선형성을 갖는 준설토의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수의 관계 규명이 매우 중요하다. 본 연구에서는 실내시험을 통해 비선형 유한변형 압밀해석에 필요한 인자를 산정하는 방법을 제안하였다. 또한, 본 연구에서 제안한 방법을 적용하여 인천지역 준설토와 카올리나이트의 압밀 물성치를 평가하였고, 이를 동반논문에서 다룰 비선형 유한변형 압밀해석에 적용하였다.

Keywords : Dredged soil, Non-linear finite strain consolidation, Self-weight consolidation, Zero effective stress void ratio

1 (주) 동명기술공단 (DMEC Co., Ltd.)

2 학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environ & Architect. Engrg., Korea Univ.)

3 학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environ & Architect. Engrg., Korea Univ.)

4 (주) 건화 (Kunhwa Consulting & Engrg. Co., Ltd.)

5 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environ & Architect. Engrg., Korea Univ., hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

준설패립을 통해 조성된 지반은 고함수비이고 고압 축성인 초연약 지반으로서 비선형 압축성과 투수성을 갖는다. 특히, 저응력 구간과 고응력 구간에서의 압축지수(C_c)가 다른 준설패립지반에 대한 비선형 유한변형 압밀해석을 위해서는 연약지반의 압밀특성에 대한 정확한 이해가 필요하다(Bo, 2002). 1923년 Terzaghi는 압밀시 미소변형이며, 압밀이 진행되는 동안 투수계수가 일정하고 응력-변형률의 관계가 선형이라고 가정하여 일차원 압밀이론을 제시하였다. 하지만, Terzaghi의 일차원 압밀이론은 고함수비의 준설패립지반에서 두드러지게 나타나는 대변형 특성인 응력-변형률의 비선형성, 압밀이 진행되는 동안 투수계수의 감소를 고려하지 못하는 문제점을 지니고 있다.

Gibson 등(1967)은 Terzaghi이론을 보완한 준설패립지반의 자중압밀을 고려한 비선형 유한변형 압밀이론을 제시하였다. Cargill(1982, 1983)은 Gibson 등(1967)이 제안한 편미분 방정식을 수치해석으로 풀기 위한 유한차분식을 제시하였으며, Stark 등(2005a, 2005b)은 준설패립지반 수치해석 프로그램인 PSDDF(Primary Consolidation Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill)을 개발하였다.

비선형 유한변형 압밀이론을 기반으로 준설패립지반의 압밀거동의 예측을 위해서는 준설토의 초기간극비(e_{00})와 비선형 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 관계의 규명이 필요하다. 초기간극비(zero effective stress void ratio)는 준설토의 자중압밀 거동에 있어서 자중압밀이 시작하는 초기 상태를 의미한다. 초기간극비는 침강과정과 압밀과정 사이의 천이구간에 해당하는 상태를 나타내며, 준설토 입자들이 서로 접촉하기 시작하여 입자간의 응력을 전이하는 순간의 간극비를 의미한다. 따라서 이론적으로 초기간극비 상태에의 유효응력은 영(zero)이다. 또한, 자중압밀 과정과 같은 낮은 유효응력 구간($0 \sim 1\text{kPa}$)에서는 초기간극비에 따라 매우 다른 압밀거동 양상을 보이기 때문에 연약지반의 압밀거동 해석에서 초기간극비를 정확히 산정하는 것은 매우 중요하다(Znidarcic, 1999). PSDDF 해석을 위해서는 모든 준설패립토의 초기간극비가 입력치로 필요하고, 이는 자중압밀 계산의 시작점이 된다(Stark 등, 2005a; 최항석 등, 2006, 2007). 여기서 정의되는 초기간극비는 침강이 완료된 퇴적토층 전체에 동시에 존재하는 간극비로 가

상의 자중압밀 시점이 된다. 즉, 전 퇴적토층의 유효응력이 영인 상태를 의미하는데, 이 상태는 실제로는 존재하지 않는 가상의 시점이다. 그 이유는 비록 상부층에서 이 가상조건에 도달한다 하더라도 그 하부층에서는 이미 자중압밀이 진행되고 있기 때문이다(한국지반공학회, 2004). 하지만, 일반적으로 준설패립은 준설킬정에 따라 단계적으로 수행되므로 단계해석에서 고려할 각 퇴적토층의 두께는 충분히 작아 본 논문에서 가정한 전층에 일정한 초기간극비를 합리적으로 적용할 수 있다고 사료된다. 초기간극비 개념이외에 자중압밀 시점에 대한 정의는 각기 다른 국내외 연구자들에 의해 제안되었다(Kynch, 1952; Monte and Krizek, 1976; Yano, 1985; 유건선과 정인준, 1979; 김수삼, 1983). 본 논문에서는 초기간극비 산정을 위하여 Znidarcic(1999)이 제시한 자중압밀 완료 후, 표층의 함수비를 측정하는 방법과 전기비저항 탐침법을 이용하는 방법을 적용하여 인천지역 준설토와 카울리나이트 시료에 대한 초기간극비를 평가 비교하였다.

준설패립지반의 비선형 유한변형 압밀거동에 영향을 주는 또 다른 중요한 요소는 준설토의 비선형 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수의 관계이다. 자중압밀을 지배하는 낮은 유효응력 상태와 추가하중을 고려할 수 있는 높은 유효응력 범위를 모두 고려하기 위해서 자중압밀 실험을 통해 유효응력이 약 1.0kPa 보다 낮은 응력상태에서의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수의 관계를 얻어낼 수 있으며 표준 압밀시험이나 CRS 압밀시험을 통해 1.0kPa 보다 높은 유효응력에서의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수와 관계를 얻어낼 수 있다. 본 논문에서는 침강 및 자중압밀시험, CRS 압밀 시험 등 일련의 실내시험을 통해 인천 준설토와 카울리나이트 시료의 비선형 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계를 산정하여 동반논문에서 다룬 비선형 유한변형 압밀해석에 입력값으로 적용하였다.

2. 비선형 압밀 물성치

2.1 초기간극비

2.1.1 초기간극비 정의

침강 및 자중압밀 시험을 통해서 산정하게 되는 초기간극비(e_{00} ; void ratio at zero effective stress)는 침강압밀이 끝나고 자중압밀이 시작되는 초기 상태에서의 시

료의 간극비를 의미한다. 일반적으로 초기간극비는 침강 및 자중압밀 시험이 종료된 후 채취한 표층시료가 완전포화상태(포화도=100%)이므로 표층시료의 함수비(w_{00})로부터 식 (1)을 이용하여 산정한다.

$$e_{00} = w_{00} G_s \quad (1)$$

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. 즉, 시료의 자중압밀은 초기간극비 상태에서부터 시작되며 자중에 의해 발생된 과잉간극수압이 시간에 따라 소산되면서 유효응력이 발생되어 자중압밀이 진행된다.

자중압밀 과정과 같은 낮은 유효응력구간(0~1kPa)에서는 초기간극비에 따라 상이한 압밀거동 양상을 보이기 때문에 연약지반의 침하거동해석에서 초기간극비를 정확히 산정하는 것은 매우 중요하다(Znidarcic, 1999). 또한, 초기간극비에 따라 PSDDF와 같은 비선형 유한변형 압밀해석에서 총 침하량에 차이가 발생하기 때문에 합리적이고 정확한 초기간극비 산정은 준설토매립지반 개량시 매우 중요하다.

2.1.2 초기간극비 측정법

이론적으로 초기간극비는 침강 및 자중압밀 시험이 종료된 후, 즉 시료의 침강 및 자중압밀이 완전히 완료되어 시료의 과잉간극수압이 모두 소산되었을 때 시료의 표면에서의 간극비이다. 이는 자중압밀이 완료된 시료의 표면에서는 유효응력이 영이고 임의의 깊이에서는 유효응력이 $\gamma'z$ 이기 때문이다(geostatic 조건). 초기

간극비를 측정하는 방법에는 Znidarcic(1999)이 제안한 시료 표면에서의 시료를 채취하여 함수비를 측정하는 시료표면 채취법과 본 논문에서 제안하는 시료표면의 전기 비저항 값을 통해 산정하는 전기 비저항 탐침법이 있다.

가. 시료표면 채취법

초기 간극비를 산정하기 위하여 침강 및 자중압밀이 종료된 후, 상부시료의 표면 위에 부유물과 상층액을 조심스럽게 제거하고 표면에서 채취한 시료의 함수비를 측정함으로써 식 (1)을 이용하여 자중압밀이 시작하는 시점의 간극비를 산정할 수 있다(Znidarcic, 1999). 이때 표면에서 시료를 채취하는 과정에서 세심한 주의가 필요하다. 이 측정법은 단순하고 간편하지만, 시료표면 채취시 실험자의 숙련도에 따라 측정오차가 발생할 수 있는 단점이 있다.

나. 전기 비저항 탐침법

침강 및 자중압밀이 완료된 후, 전기 비저항 측정을 위해 고안된 탐침을 상부 상층액에서부터 자중압밀 시료까지 연속적으로 관입하여 비저항을 측정한다. 이때 상부에 있는 상층액과 자중압밀 시료의 전기 비저항 측정값은 매우 다른 양상을 보인다. 즉, 비저항 측정용 탐침이 상층액 내에서는 거의 일정한 비저항 값(자중압밀 시료보다 매우 작은 값)을 갖는다. 탐침이 상층액과 자중압밀 시료의 경계면에 도달하면, 측정된 비저항 값이 급격히 감소하고, 이후 자중압밀 시료 내부에서의 비저항 값은 깊이에 따라 증가한다. 이러한 비저항 값의 차이를 이용해 전기 비저항 탐침법은 상층액과 자중압밀 시료표면의 경계면을 정확하게 구분 할 수 있고, 경계면



(a) 전기 저항 측정 장비(LCR Meter)



(b) 전기 비저항 탐침

그림 1. 전기 비저항 탐침 장비

에서의 비저항 값을 통해 초기간극비를 산정할 수 있다. 그림 1은 전기 비저항 탐침법을 적용하기 위한 전기 비저항 측정 장비와 측정 탐침을 보여준다.

그림 2는 전기 비저항 탐침 장비를 이용하여 침강 및 자중압밀이 완료된 시료에 전기 비저항 탐침을 관입하여 비저항을 측정하는 모식도를 보여준다.

전기 비저항 탐침 시험은 지반에 전류를 흘려 발생하는 전위차를 측정하여 연속적으로 시료의 고유 비저항을 산출하고 이를 통해 시료의 재료적인 특성을 알아내는 방법이다. 흙의 특성인 고유 저항 ρ_{soil} 과 전극의 기하학적 형상에 따라 측정되는 저항 R_{soil} 은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다(Lee, 2003).

$$R_{soil} = \alpha \rho_{soil} \quad (2)$$

여기서, 상수 α 는 간극수의 전기 전도도와 저항을 측정함으로써 얻어진다. 포화된 흙 시료의 전기 전도도는 입자 전도도와 전해질 전도도 그리고 입자의 비표면적 전도도로 구성되며, 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{mix} = (1-n)\sigma_p + n\sigma_{cl} + (1-n)\frac{\gamma_p}{g}\lambda_{ddl}S_a \quad (3)$$

여기서, σ_{mix} 는 포화된 흙의 전체 전기전도도, σ_p 는 입자의 전기전도도, σ_{cl} 는 전해질의 전도도, γ_p 는 흙 입자의 단위중량, λ_{ddl} 는 입자의 표면 전도도, S_a 는 입자의 비표면적, n 은 간극률, g 는 중력가속도를 의미한다. 해성점토인 경우 전해질의 전도도가 입자의 전기전도도와 입자의 비표면적 전도도에 비해 매우 크므로 식 (3)

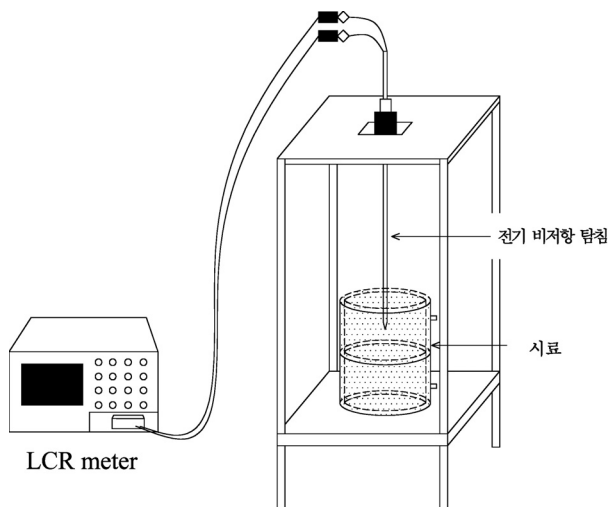


그림 2. 전기 비저항 탐침 시험 모식도

을 다음과 같이 간략화 할 수 있다(Lee, 2003).

$$\sigma_{mix} = n\sigma_{cl} \quad (4)$$

또한, Archie(1942)의 경험식은 흙 입자와 간극수의 고유저항 관계를 비선형으로 표현하여 다음 식 (5)와 같이 제시하였다.

$$\rho_{soil} = \rho_{cl}n^\theta \quad (5)$$

위 식에서 ρ_{soil} 과 ρ_{cl} 은 각각 흙의 고유저항과 간극수의 고유저항, θ 는 피팅 상수로 약 -1에서 -2.4의 범위의 값을 가진다. 자중압밀이 완료된 후 측정된 깊이별 시료의 간극률(n)과 전기 비저항 탐침에 의해 측정된 전기 비저항 관계를 이용하여 θ 를 산정한다. 산정된 θ 와 시료 표면에서 측정된 전기 비저항을 식 (5)에 대입하면 초기간극비에 해당하는 시료의 간극률을 구할 수 있다. 전술했듯이 상층액과 자중압밀 시료 표면의 비저항 값은 확연히 구분되므로, 전기 비저항 탐침을 통해 상층액과 시료표면의 정확한 경계면을 파악하여 초기간극비를 산정할 수 있다.

2.2 간극비-유효응력 관계

슬러리 상태와 같은 고함수비의 초연약 지반에서의 압밀은 통상의 점토지반에서의 압밀과는 다른 특성을 보인다. 일반적인 점토지반은 응력상태에 관계없이 일정한 압축지수(C_c)를 갖지만, 슬러리 상태에서 자중압밀이 완료된 고함수비의 초연약지반은 저응력 구간과 고응력 구간에서 다른 압축지수를 보인다(Bo, 2002). 자

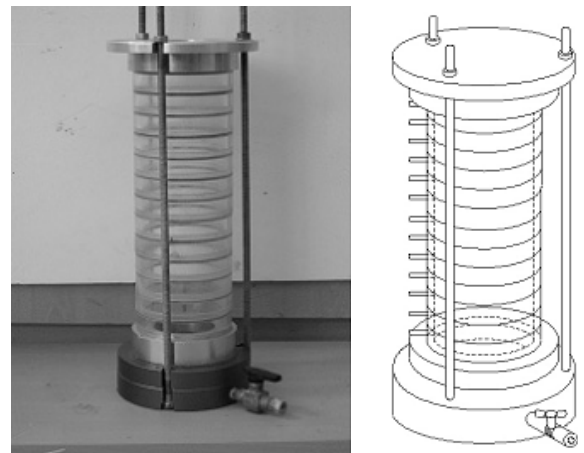


그림 3. 복합자중압밀 시험기 모식도

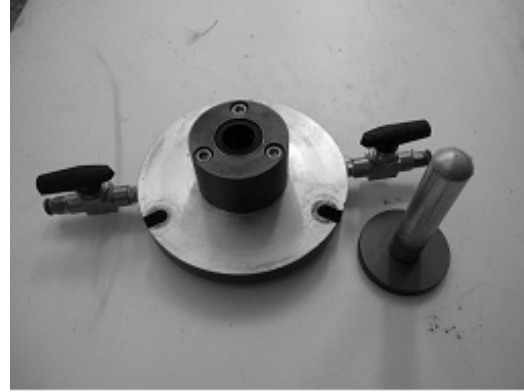
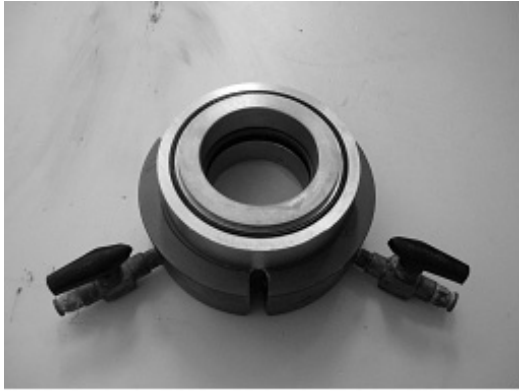


그림 4. 복합자중압밀 시험기 하부 CRS 압밀 시험용 셀

중압밀과 같은 저응력 상태에서 압밀시 압축지수는 고응력 구간에서의 압축지수에 비해 매우 큰 값을 갖는다. 따라서, 준설 매립지반의 압밀특성을 파악하고 비선형 유한변형 압밀해석에 필요한 입력값을 얻기 위해 저응력 및 고응력 구간에서의 간극비-유효응력 관계를 정확하게 규명할 필요가 있다.

본 논문에서는 저응력 구간(유효응력이 약 1.0kPa 보다 낮은 응력상태)의 간극비-유효응력 관계는 자중압밀 시험을 실시하여 산정하고, 고응력 구간(유효응력이 약 1.0kPa 보다 큰 응력상태)의 간극비-유효응력 관계를 규명하기 위해 CRS 압밀실험을 실시하였다. 또한, 실험 결과의 일관성을 유지하기 위해 자중압밀 실험과 CRS 압밀실험을 동일한 시료에서 연속적으로 수행할 수 있는 그림 3과 같은 복합자중압밀 시험기를 개발하였다. 복합자중압밀 시험기의 각 층은 지름 8cm, 높이 2cm의 투명 아크릴 링을 연속적으로 쌓아 올려 총 높이가 50cm 이고 자중압밀이 진행되는 동안 각 층에서의 간극수압을 측정할 수 있다. 시료의 자중압밀이 완료된 후, 각 아크릴 링은 분리되어 각 층 시료의 함수비를 측정할 수 있도록 한다. 시험기의 하부는 자중압밀이 완료된 후 CRS 압밀실험을 위한 셀로 사용할 수 있고, 하부의 벨브를 이용하여 일면 및 양면배수 조건을 모사하게 된다. 그림 4는 복합자중압밀 시험기의 하부 장치, 즉 CRS 압밀실험을 위한 셀을 보여준다. CRS 압밀실험은 자중압밀이 완료된 후 하부 CRS 압밀실험용 셀에 남겨진 시료를 이용하여 실시하게 되는데, 복합자중압밀 시험기의 경우 이러한 과정에서 시료의 교란 없이 CRS 압밀실험을 진행할 수 있는 장점을 갖는다.

복합자중압밀 시험기를 이용하여 시료의 자중압밀이 완료되면 CRS 압밀 시험을 위한 하부의 시료를 제외한 상부의 시료를 층별로 분리하여 각 층에서의 시료의 함

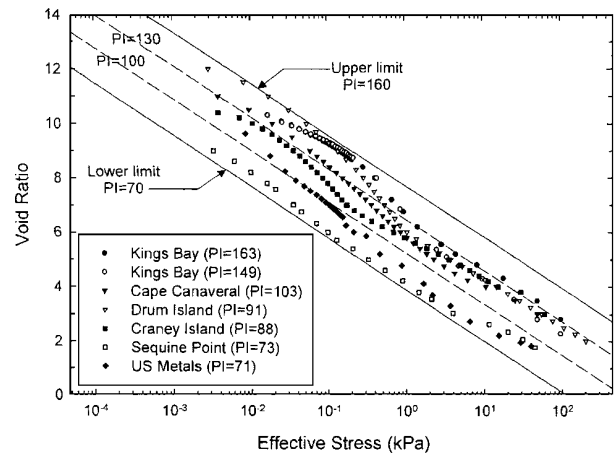


그림 5. 소성지수에 따른 간극비-유효응력 관계(Stark 등, 2005b)

수비를 측정한다. 측정된 함수비로부터 각 층의 간극비를 산정할 수 있고, 각 층의 간극비와 표면에서부터 깊이 z_i 에 대해 식 (6)을 이용하여 각 층의 유효응력을 산정한다.

$$\sigma'_j = \sum_{i=1}^j \left(\frac{G_s - 1}{1 + e_i} \right) \Delta z_i \quad (6)$$

여기서, σ'_j =상부 표면에서부터 임의 지점의 유효응력(j =아크릴 링 층 수), G_s =시료의 비중, e_i =상부 표면에서부터 i 번째 층의 측정 간극비, Δz_i = i 번째 층의 두께 (본 연구의 복합자중압밀 시험기 경우는 $\Delta z_i=2$ cm). 복합자중압밀 시험기에서 자중압밀이 완료된 후, 아크릴 링의 시료를 분리하여 저응력 상태에서의 간극비-유효응력 관계를 산정하고, 고응력 상태에서의 간극비-유효응력 관계는 CRS 압밀실험용 셀에 담긴 시료를 이용한 CRS 압밀실험을 통하여 산정하게 된다. 전술한 준설 매립토의 간극비-유효응력 관계는 비선형성을 나타내는 특징을 가지며, Stark 등(2005b)은 미공병단에서 관찰하

는 항로에서 준설한 무기점토에 대한 소성지수에 따른 간극비-유효응력 관계를 다음 그림 5와 같이 제시하였다.

2.3 간극비-투수계수 관계

초연약 준설 매립지반의 압밀이 진행되는 동안 토체의 간극비가 급격히 감소하게 되고, 이에 따라 매립지반의 투수계수도 감소한다. 따라서, 간극비-투수계수 관계도 간극비-유효응력 관계와 같이 주요한 비선형 유한변형 압밀 특성 중 하나이다. 준설 매립지반의 압밀특성을 파악하고 비선형 유한변형 압밀해석에 필요한 입력값을 얻기 위해 저응력 및 고응력 구간에서의 투수계수 관계를 정확하게 규명할 필요가 있다. 본 논문에서는 간극비-유효응력 관계에서와 동일하게, 저응력 구간(유효응력이 약 1.0kPa 보다 낮은 응력상태)의 간극비-투수계수 관계는 자중압밀 시험을 실시하여 산정하고, 고응력 구간(유효응력이 약 1.0kPa 보다 큰 응력상태)의 간극비-투수계수 관계를 규명하기 위해 CRS 압밀실험을 실시하였다.

Been과 Sills(1981)는 자중압밀이 진행되는 동안 측정된 과잉간극수압과 계면고의 변화를 측정 후 Darcy 법칙과 연속성 법칙을 이용하여 임의의 간극비에서 투수계수를 산정하는 방법을 제시하였다. 일반화된 Darcy의 법칙을 다음의 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$n(v_f - v_s) = -ki \quad (7)$$

여기서, v_s 는 흙 입자의 속도, v_f 는 간극수의 속도, i 는 동수경사, n 은 간극률, k 는 투수계수를 의미한다. 또한, 연속성 법칙을 적용하여 식 (8)의 관계를 얻을 수 있다.

$$v_s(1-n) + v_f n = 0 \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로부터 흙 입자의 평균 속도와 평균 동수경사를 이용하며 투수계수는 다음 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$k = -v_{s,ave}/i_{ave} \quad (9)$$

여기서, $v_{s,ave}$ 는 흙 입자의 평균 속도, i_{ave} 는 평균 동수경사를 의미한다. 흙 입자의 평균 속도는 자중압밀이 진행되는 동안 임의의 시간 동안의 계면고의 변화로부터, 평균 동수경사는 간극수압 소산 그래프로부터 산정한

다. 자중압밀이 진행되는 동안 배수가 발생하면서 전체 부피는 감소하지만 흙 입자만의 부피는 변하지 않는다. 따라서 임의의 시간에서, 즉 임의의 계면고에서의 간극비를 산정할 수 있고, 이로부터 해당 간극비에서의 투수계수 산정이 가능하다.

또한, Cargill(1986)은 자중압밀 시험 결과로부터 투수계수를 산정하는 방법을 제안하였다. 자중압밀이 완료된 후, 전술한 대로 저응력구간에서 간극비-유효응력 관계를 구하기 위해 복합자중압밀 시험기를 층별 분리하여 각 층에서의 시료의 함수비를 측정하고 이로부터 포화상태인 각 층의 간극비를 산정한다. 그림 6과 같이 자중압밀 시험결과로부터 산정된 간극비-유효응력 관계에 다음 식 (10)을 피팅한다. 피팅 결과 가장 근접한 곡선을 찾고 이 곡선에 해당하는 λ 값을 산정한다.

$$e = (e_{00} - e_{\infty})\exp(-\lambda\sigma') + e_{\infty} \quad (10)$$

여기서, e_{∞} 는 최종간극비(자중압밀이 완료된 후 시료 최하부의 간극비)를 의미한다.

그림 6과 식 (10)을 통해 산정된 λ 를 다음의 식 (11)에 대입하여 N 값을 계산한다.

$$N = \lambda l(\gamma_s - \gamma_w) \quad (11)$$

여기서, l 은 흙 입자만의 높이, γ_s 은 흙 입자의 단위중량, γ_w 는 물의 단위중량을 의미한다.

예를 들어, 본 연구에서 사용한 카올리나이트는 초기 간극비에 해당하는 함수비가 280%이고 자중압밀 실험 초기 높이가 30cm일 경우, 식 (11)의 l 은 3.56cm로 계

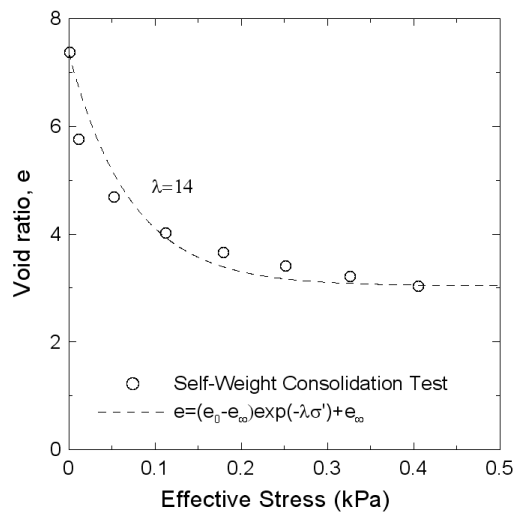


그림 6. 간극비-유효응력 관계와 추정곡선

산된다. 또한, 카올리나이트의 γ_s 는 $2.65t/m^3$ 이므로, 그림 6과 식 (10)으로부터 구한 $\lambda=14$ 를 식 (11)에 대입하면 $N=0.82$ 를 얻을 수 있다. 이 N 값을 Morris(2002)가 양면배수 조건에서 제시한 간편 이론식에 대입하면, 그림 7과 같은 시간계수(T)에 따른 압밀도 그래프를 구할 수 있다. 이 그래프에서 압밀도가 50%일 때의 시간계수(T_{50})를 산정하면, 이 경우 시간계수(T_{50})는 0.054이다. 카올리나이트 시료의 자중압밀 시험결과로부터 계면고의 변화가 총 압밀침하량의 50%일 때의 시간(t_{50})을 찾고 이를 식 (12)에 대입하여 유한변형 압밀계수(g)를 산정한다.

$$g = \frac{T_{50} l^2}{t_{50}} \quad (12)$$

식 (12)에서 산정된 유한변형 압밀계수(g)를 식 (13)에 대입하여 자중압밀이 진행되는 동안의 평균 투수계수를 산정할 수 있다.

$$k = -g\gamma_w(1 + e_{ave}) \frac{de}{d\sigma'} \quad (13)$$

여기서, k 는 50% 자중압밀 시 평균 투수계수, e_{ave} 는 50% 자중압밀 시 평균 간극비, 그리고 $\frac{de}{d\sigma'}$ 는 평균 간

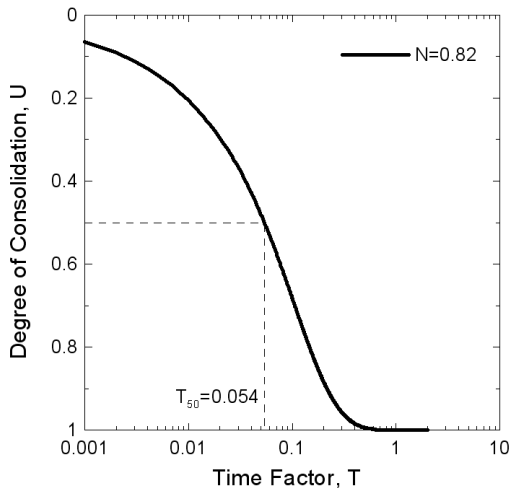


그림 7. 시간계수에 따른 압밀도(카올리나이트 30cm 시료 양면배수 N=0.82)

극비에서의 압축계수를 의미한다.

고응력 구간의 간극비-투수계수 관계는 CRS 압밀시험시, 시간에 따라 측정되는 변위량과 간극수압을 이용하여 식 (14)로부터 투수계수를 산정한다.

$$k = \frac{1}{2} \frac{rH\gamma_w}{u_h} \quad (14)$$

여기서, r 은 변형률(CRS 압밀 시험 시 적용된 변형률을 적용), H 는 시료의 두께, u_h 는 시료 하부에서 측정된 간극수압을 의미한다. 전술한 준설 매립토의 간극비-투수계수 관계는 비선형으로 Stark 등(2005b)은 미공병단에서 관할하는 항로에서 준설한 무기점토에 대한 소성지수에 따른 간극비-투수계수 관계를 다음 그림 8과 같이 제시하였다.

3. 비선형 압밀 물성치 산정 결과

3.1 기본 물성시험

비선형 유한변형 압밀해석을 위한 물성치는 인천지역 준설매립장에서 채취한 해성점토와 카올리나이트 두 가지 점토시료에 대해 각각 산정하였으며 시료의 기본 물성치는 표 1에 비교하였다. 인천지역의 해성준설토의 경

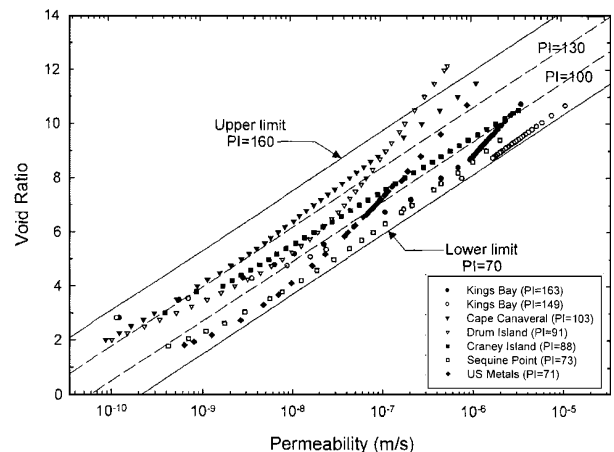


그림 8. 소성지수에 따른 간극비-투수계수 관계(Stark 등, 2005b)

표 1. 시료의 기본 물성치

구분	흙의 분류	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI, %)	염분함유율 (%)	비중 (G_s)
인천 준설토	CH	55.9	21.9	34.0	2.67%	2.65
카올리나이트	CH	61.2	30.4	30.8	.	2.65

표 2. 시료의 XRD 분석결과

구분	Qtz	PI	K-f	Ka	Ill	Kln	Gib
인천 준설토	50.3%	19.1%	8.6%	.	15.9%	6.1%	.
카올리-나이트	2.9%	.	.	90.3%	.	.	6.7%

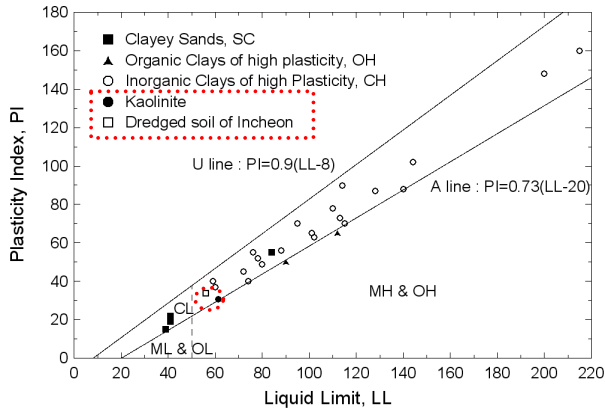


그림 9. 준설토의 연경도 비교

우는 채취한 해성점토를 그대로 사용한 후 염도를 고려하여 Imai 등(1979)이 제시한 방법으로 함수비를 보정하였다. 두 시료의 액성한계와 소성지수의 관계를 미공병단에서 관찰하는 항로에서 획득한 일반적인 준설토와 함께 그림 9의 소성도표에 나타내 비교하였다.

표 2는 인천 준설토와 카올리나이트 시료에 대한 XRD 분석결과를 보여준다. 인천 준설토 시료 내에는 석영(Qtz), 사장석(PI), 정장석(K-f), 일라이트(III), 고령토(Kln)가 함유되어 있으며, 석영이 전체의 광물구성 중 50.3%로 가장 비율이 높았다. 카올리나이트 시료의 경우는 카올리나이트 순도는 90.3%이고, 깃사이트(Gibbsite)와 석영(Quartz)등의 불순물이 소량 포함되어 있다.

3.2 초기간극비 측정결과

두 시료의 초기간극비를 산정하기 위해서 일련의 침강압밀시험을 수행하였다. 인천 준설토의 경우는 초기 슬러리 함수비 100%, 200%, 300% 500%, 900%, 1200%, 1500%에 대해 침강압밀이 끝난 후 Znidarcic(1999)의 시료표면 채취법으로 측정된 초기함수비($=e_{00}/G_s$)는 각각 101%, 206%, 231%, 278%, 289%, 301%, 303%이었다. 또한, 카올리나이트 시료는 초기 슬러리 함수비 100%, 200%, 300% 500%, 700%, 900%, 1100%, 1300%에 대해 침강압밀을 완료한 후, 동일한 방법으로 측정된 초기 함수비는 각각 102%, 200%, 235%, 245%, 264%, 279%, 298%, 309%로 나타났다. 초기함수비는 침강압밀이 완

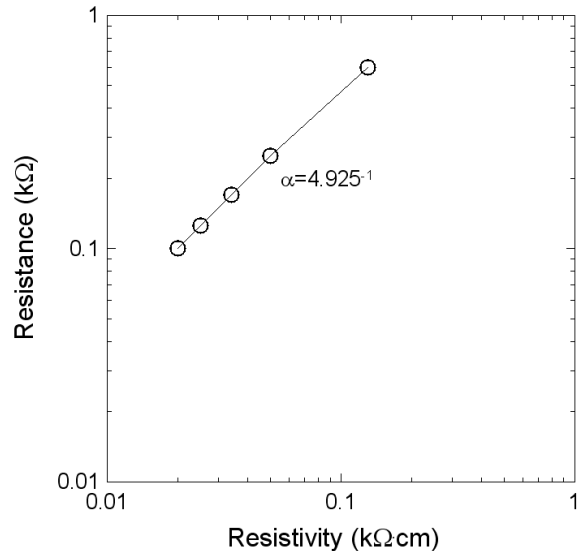


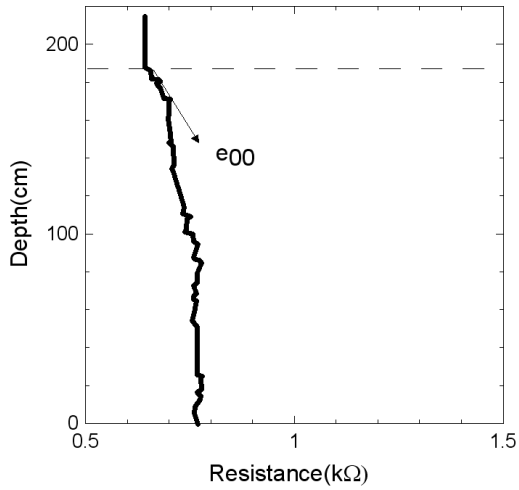
그림 10. 전기 비저항 탐침의 보정 (α)

료된 시료표면 3곳에서 채취하여 평균한 값이다.

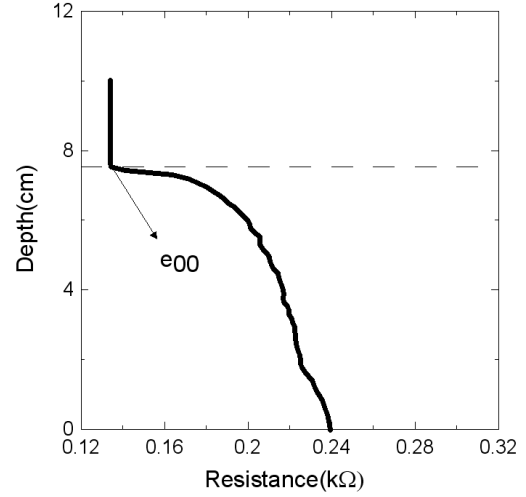
전기 비저항 탐침법은 탐침의 기하학적인 특성, 재질, 전극의 길이 등에 따라 측정된 저항값이 달라지므로 식 (2)을 이용하여 염도에 따른 물의 전도도와 전기 비저항 탐침으로 측정된 저항값의 관계로 산정한 $\alpha = 4.925 \text{ cm}^{-1}$ 를 사용하였다(그림 10 참조). 전기 비저항 탐침을 침강압밀이 완료된 시료에 관입시키면서 시료의 저항값을 측정해보면 그림 11과 같은 값에 따른 저항분포를 얻을 수 있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 상층액과 시료 표면의 경계면을 정확하게 구분할 수 있다. 침강압밀이 완료된 후 층별로 분리되는 시험장치에서 측정된 시료 하부에서의 깊이별 간극률과 전기 비저항 탐침에 의해 측정된 전기 비저항과의 관계를 통해 식 (5)를 이용하여 θ 를 산정하였다(그림 12). 산정된 θ 는 인천 준설토는 -2.180, 카올리나이트는 -1.886이다.

시료표면 채취법 및 전기 비저항 탐침법으로 산정된 인천 준설토와 카올리나이트의 초기간극비(e_{00})-초기 슬러리 간극비(e_0) 관계는 각각 그림 13과 14와 같다.

그림 13과 그림 14에서 볼 수 있듯이 초기간극비는 시료에 대한 특정한 토질정수가 아니며 초기 슬러리 간극비에 따라 변한다. 이 사실은 낮은 유효응력 상태일 때 초기 슬러리 함수비가 충분히 커서 자유수의 양이 증가하면 확산 이중층이 팽창하여(즉, 확산 이중층이 두

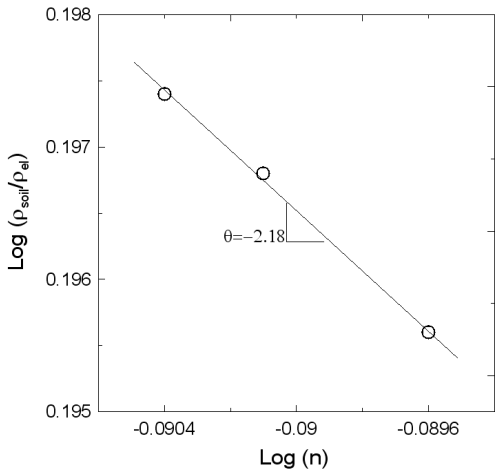


(a) 인천 준설토

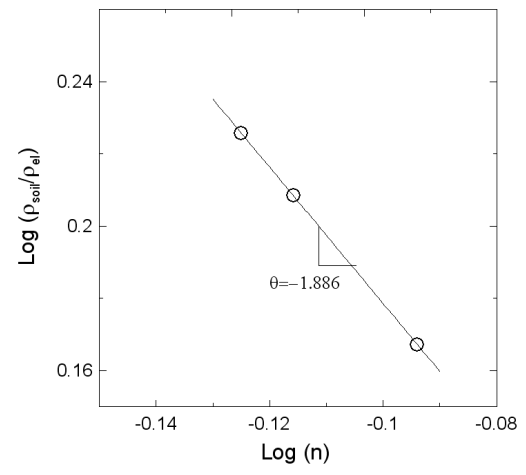


(b) 카올리나이트

그림 11. 시료 깊이별 저항 분포



(a) 인천 준설토



(b) 카올리나이트

그림 12. 깊이별 간극률-전기 비저항 관계

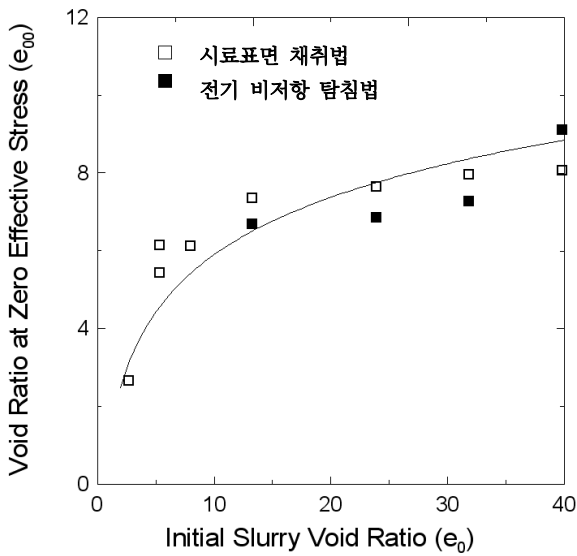


그림 13. 초기 간극비-초기 슬러리 간극비 관계(인천 준설토)

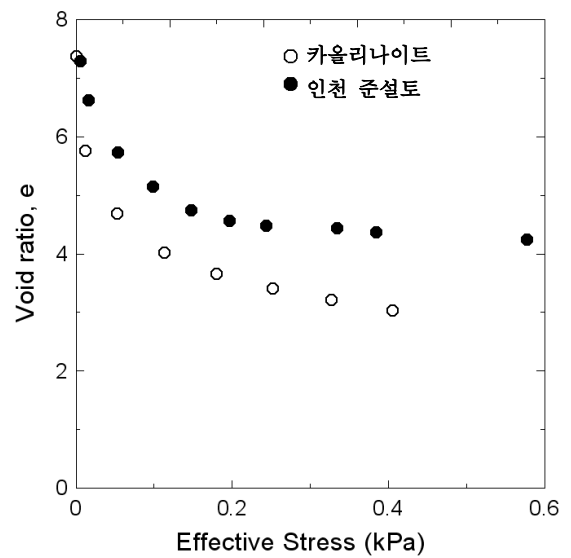


그림 14. 초기 간극비-초기 슬러리 간극비 관계(카올리나이트)

꺼워져) 슬러리 입자간의 거리가 늘어나기 때문에 초기 간극비가 다소 커진다고 추정할 수 있다.

3.3 간극비-유효응력 관계 선정결과

복합자중압밀 시험기를 이용하여 인천 준설토와 카울리나이트 시료에 대한 자중압밀 시험을 실시하였다. 현장에서 예상되는 초기 슬러리 함수비를 고려하여 시료표면 채취법과 전기 비저항 탐침법으로 산정한 초기 간극비 7.29(인천 준설토)와 7.38(카울리나이트)로 시료의 간극비를 조절하여 자중압밀실험을 수행하였다. 복

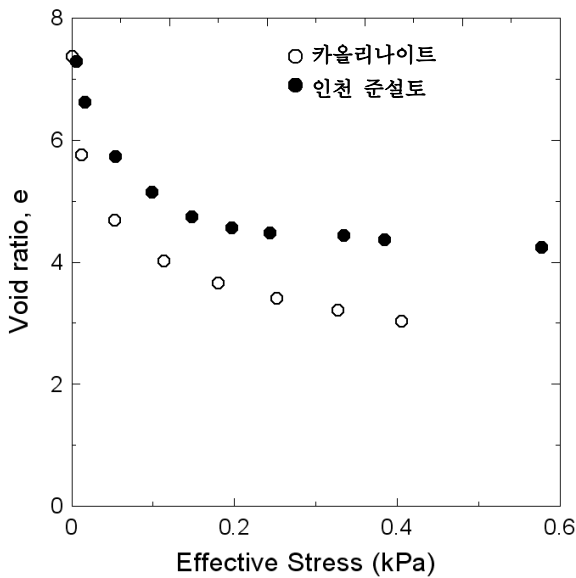


그림 15. 간극비-유효응력 관계(자중압밀 실험결과)

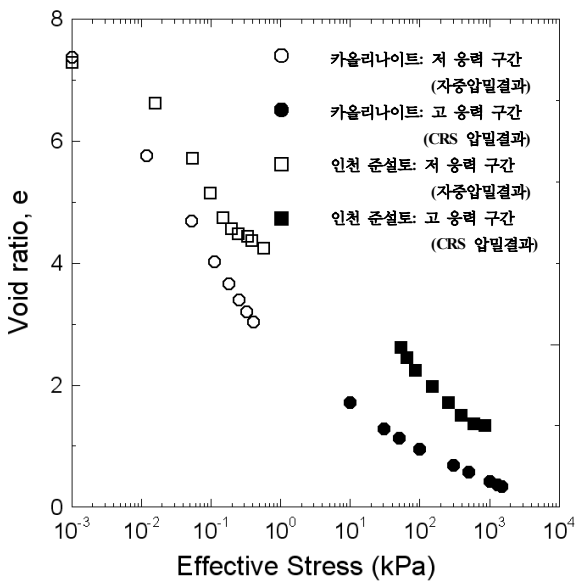


그림 16. 간극비-유효응력 관계(자중압밀과 CRS압밀 실험결과)

합자중압밀 시험기에서 자중압밀이 완료된 후, 각 층의 함수비 측정을 통해 간극비를 산정하였다. 또한, 식 (6)을 이용해 각 간극비에 해당하는 유효응력을 구해보면 그림 15와 같은 간극비-유효응력 관계를 구할 수 있다.

자중압밀이 완료된 후 복합자중압밀 시험기의 하부 CRS 압밀시험용 셀의 시료를 이용하여 CRS 압밀실험을 실시하였다. 그림 16에는 그림 15의 자중압밀실험 결과와 CRS 압밀실험을 통해 산정된 간극비-유효응력 관계를 함께 나타냈다. 저응력 구간인 자중압밀실험 부분과 고응력 구간인 CRS 압밀실험 부분이 비선형 관계를 보임을 알 수 있다. 초기간극비에 대한 유효응력은 이론상 0이지만, 그림 16에서는 그래프에서 유효응력을 나타내는 축이 로그로 표현되기 때문에 초기 간극비에 해당하는 유효응력을 0.001kPa로 표현하였다. 본 논문에서 얻어진 간극비-유효응력 관계는 PSDDF와 같은 비선형 유한변형 압밀해석 수치해석의 입력값으로 사용된다.

3.4 간극비-투수계수 관계 선정결과

Been과 Sills(1981)이 제시한 투수계수 산정법을 적용하기 위하여 카울리나이트의 자중압밀실험 도중 발생한 간극수압을 측정하였다. 측정된 시료 깊이별 간극수압 분포는 그림 17과 같다.

시간에 따른 계면고의 변화로부터 시료 입자의 평균 속도($v_{s,ave}$)를 산정하고, 그림 17에 나타낸 시간에 따른 깊이별 간극수압의 변화로부터 동수경사(i)를 산정하고 식 (9)를 이용하여 투수계수를 구하였다. 그림 18은 Been과 Sills(1981)이 제안한 방법으로 산정한 카울리나이트

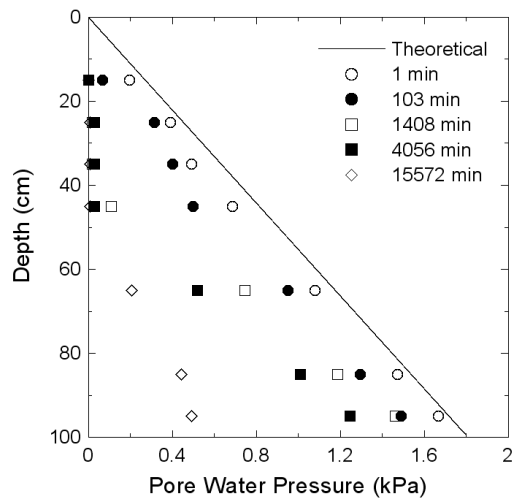


그림 17. 시간에 따른 깊이별 간극수압(카울리나이트)

의 저응력 구간에서의 투수계수이다. 인천 준설토는 시험장비 여건으로 Been과 Sills(1981)이 제안한 방법으로 투수계수를 산정하지 못하였다.

두 시료에 대해 Cargill(1986)이 제안한 방법으로 저응력 구간 투수계수 산정하여, 그림 19에 제시하였다. Been과 Sills(1981) 방법과 Cargill(1986) 방법으로 구한 카올리나이트 시료의 저응력 구간의 투수계수-간극비 관계는 두 방법 사이에 다소 차이가 발생하였는데, 이는 두 방법에서 적용한 가정의 차이로 볼 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제시한 두 방법이 저응력 구간에서 준설 매립지반의 투수계수-간극비를 얻기 위해 현재까지 제시된 유일한 방법이므로, 두 방법을 저응력 구간의 투수

계수의 상한과 하한으로 적용하는 것이 실용적 측면에서 적합하리라 사료된다.

고응력 구간의 간극비-투수계수 관계는 CRS 압밀시험시, 변위량과 간극수압을 시간에 따라 측정하고 식 (14)를 적용하여 산정하였다. 인천 준설토와 카올리나이트 시료에 대한 저응력과 고응력 구간에서 간극비-투수계수 관계를 그림 19에 같이 나타냈다. 본 논문에서 얻어진 간극비-투수계수 관계는 PSDDF와 같은 비선형 유한변형 압밀해석 수치해석의 입력값으로 사용된다.

4. 결론

본 연구에서는 동반논문에서 다룰 비선형 유한변형 압밀해석을 위한 압밀 물성치(즉, 초기간극비, 간극비-유효응력 관계, 간극비-투수계수 관계)의 의미와 이를 실험적으로 구하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 적용하여 인천 준설토와 카올리나이트 시료의 비선형 유한변형 압밀 물성치를 산정하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기간극비를 측정하기 위해 Znidarcic(1999)가 제안한 시료표면 채취법과 본 논문에서 제안하는 시료표면의 전기 비저항 값을 통해 산정하는 전기 비저항 탐침법을 비교하여 전기 비저항 탐침법의 적용성을 평가하였다. 초기간극비는 시료에 대한 특정한 토질정수가 아니고 초기 슬러리 간극비가 증가함에 따라 증가하였다. 이 사실은 낮은 유효응력

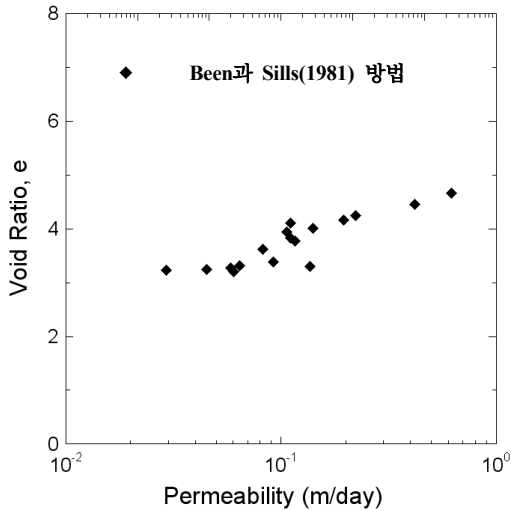
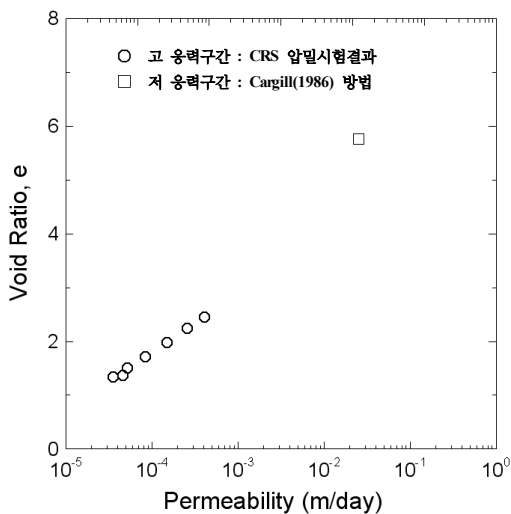
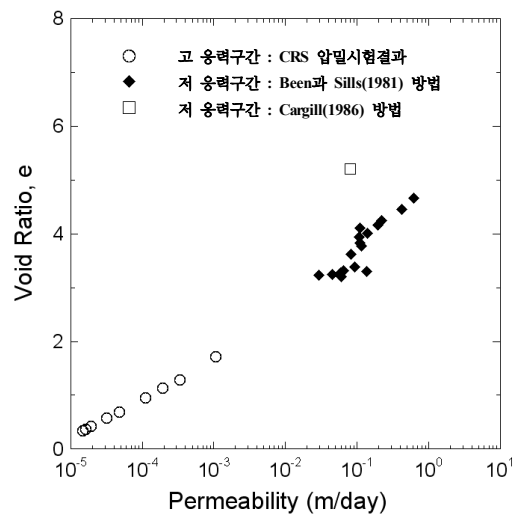


그림 18. 저응력 구간에서의 카올리나이트 투수계수(Been과 Sills, 1981)



(a) 인천 준설토



(b) 카올리나이트

그림 19. 저응력 및 고응력 구간에서의 투수계수

상태일 때 초기 슬러리 함수비가 충분히 커서 자유수의 양이 증가하면 확산 이중층이 팽창하여(즉, 확산 이중층이 두꺼워져) 슬러리 입자간의 거리가 늘어나기 때문에 초기 간극비가 다소 커진다고 추정할 수 있다.

- (2) 준설 매립지반의 비선형 유한변형 압밀거동에 영향을 주는 준설토의 비선형 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수의 관계는 단일 시험장치로 한 번에 구할 수 없고, 자중압밀을 지배하는 낮은 유효응력 상태와 추가하중을 고려할 수 있는 높은 유효응력 범위에 대해 따로 구해야 한다. 본 논문에서는 복합자중압밀 시험기를 개발하여 저응력 구간(유효응력이 약 1.0kPa 보다 낮은 응력상태)의 간극비-유효응력-투수계수 관계는 자중압밀 시험을 실시하여 산정하고, 고응력 구간(유효응력이 약 1.0kPa 보다 큰 응력상태)의 간극비-유효응력-투수계수 관계는 CRS 압밀시험을 통하여 산정할 수 있도록 하였다.
- (3) 개발된 시험장치와 시험방법을 적용하여 인천 준설토와 카올리나이트 시료의 초기간극비, 비선형 간극비-유효응력-투수계수의 관계를 규명하였다. 이 간극비-유효응력-투수계수 관계는 저응력 및 고응력 구간에서 서로 다른 경향을 보이며, 간극비가 큰 저응력 구간에서 그 변화폭이 큰 것을 알 수 있었다. 본 논문에서 얻어진 물성치는 동반논문에서 다룰 PSDDF해석과 Morris(2002)의 이론해 등 비선형 유한변형 압밀해석에 입력값으로 적용하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(09기술혁신E06)과 고려대학교 특별연구비(T1001611)에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김수삼 (1983), 한국 서해안(바일지역) 해서토의 침강에 관한 실험적 연구, 중앙대학교 박사학위 논문.
2. 유건선, 정인준 (1979), "점성토의 침식 및 퇴적에 관한 실험적 연구", 대한토목학회지, 제27권 5호, pp.55-64.
3. 최항석, 최한영, Stark, T.D. (2006), "준설매립지반의 침하거동 예측을 위한 준설토의 역학적 거동 특성", 한국지반공학학회, 준설매립위원회 학술발표회, 교총회관, 서울, 8월 25일, pp.75-86.

4. 최항석, 옥영석, 이철호, 이종선 (2007), "인천지역 준설토의 압밀 특성 분석과 현장매립 상태 예측방법 연구", 준설매립 기술위원회 학술발표회 논문집, 교총회관, 서울, 8월 24일, pp.95-104.
5. 한국지반공학학회 (2004), 준설매립, 지반공학 시리즈 10, 구미서관
6. 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, pp.54-62.
7. Been, K. and Sills, G. C. (1981), "Self-weight Consolidation of Soft Soils : An Experimental and Theoretical Study", *Geotechnique*, Vol.31, pp.519-535.
8. Bo, M. W. (2002), *Deformation of Ultra-Soft Soil*, Ph.D. Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
9. 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
10. Cargill, K. W. (1983), "Prediction of consolidation of very soft soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.6, pp.775-795.
11. 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, MS.
12. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M. J. L. (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.
13. Imai, G., Tsuruya, K., and Yano, K. (1979), "A treatment of salinity in water content determination of very soft clays", *Soil and Foundations*, Vol.19, No.3, pp.84-89.
14. Kynch, C. J. (1952), "A Theory of Sedimentation", *Trans. Faraday Soc.* Vol.48, pp.166-177.
15. Lee, J. S. (2003), *High resolution geophysical techniques for small-scale soil model testing*, Ph.D. Thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
16. Monte, J. L. and Krizek, R. J. (1976), "One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation", *Geotechnique*, Vol.26, No.3, pp.495-510.
17. Morris, P. H. (2002), "Analytical solutions of linear finite-strain one -dimensional consolidation", *Journal of geotechnical and environmental engineering*, ASCE, Vol.128, No.4, pp.319-326.
18. 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.
19. 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.
20. 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. 1. 17, 심사완료일 2011. 9. 15)