

인천 지역 준설토의 비선형 압밀특성 연구

Characterization of Non-linear Consolidation of Dredged Soil from Incheon Area

옥영석¹⁾Oak, Youngsuk, 안용훈²⁾An, Yonghoon, 이철호³⁾Lee, Chulho, 최항석⁴⁾Choi, Hangseok

¹⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environ, & Architect. Engrg, Korea Univ.)

²⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environ, & Architect. Engrg, Korea Univ.)

³⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Graduate student, Dept. of Civil, Environ, & Architect. Engrg, Korea Univ.)

⁴⁾ 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 (Associate professor, Dept. of Civil, Environ, & Architect. Engrg, Korea Univ.)

SYNOPSIS : 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 ultra-soft dredged materials. The zero effective stress void ratio means a transitional status from sedimentation to self-weight consolidation of very soft soil deposits, and acts as a starting point for self-weight consolidation in the non-linear finite strain numerical analysis such as PSDDF. In this paper, a new method for determining the zero effective stress void ratio has been introduced with the aid of measuring electrical resistivity of the specimen. A correlation between the zero effective stress void ratio and the initial slurry void ratio has been proposed, which can be used in PSDDF analysis as an input parameter. Combining all of the accessible experimental data, the consolidation characteristics of a dredged soil from the Incheon area has been studied in detail.

Key words : non-linear finite strain consolidation, initial void ratio of slurry, zero effective stress void ratio, self-weight consolidation, electrical resistivity method, PSDDF

1. 서론

Terzaghi의 일차원 압밀이론식은 미소변형률 가정과 투수계수, 압축계수 등이 일정하다는 조건하에 압밀지배 방정식을 제안하였지만, 실제 연약지반과 같이 큰 침하 양상을 보이는 압밀거동 해석에는 적절하지 않다. Mikasa(1965)는 점토층의 깊이에 따라 초기 간극비가 일정하다는 조건하에 일반적인 유한변형률 압밀 지배방정식을 제안하였으며, Gibson 등(1967)은 간극수와 토립자로 구성된 혼합체의 힘의 평형, 토립자와 간극수의 시간변화에 대한 질량보존을 고려한 연속정리, 간극비와 유효응력의 구성식, 간극비와 투수계수의 구성식을 이용하여 비선형 유한변형률 압밀지배방정식을 제시하였다. 또한, Cargill(1982)은 기존의 비선형 유한변형 압밀식을 수치 해석적으로 풀기 위한 유한 차분식이 제시되었으며, 이 유한 차분식은 비선형 유한변형률 압밀해석 프로그램인 PSDDF(Primary Consolidation, Secondary compression, and Desiccation of Dredged Fill, Stark 등, 2005)에서 적용되고 있다. 이러한 PSDDF 프로그램 해석에서는 준설토의 초기간극비와 유효응력-간극비-투수계수의 관계가 매우 중요한 인자로 작용한다. 초기 간극비(e_{00} ; Zero effective stress void ratio)는 준설토의 자중압밀 거동에 있어서 자중압밀이 시작하는 초기 상태를 의미한다. 초기 간극비는 침강과정과 압밀과정 사이의

경계면에 해당하는 상태를 나타내며, 준설토 입자들이 서로 접촉하기 시작하여 입자간의 응력을 전이하는 순간의 간극비를 의미한다. 따라서 이론적으로 초기 간극비 상태에의 유효응력은 영(zero)이다. 또한, 자중압밀 과정과 같은 낮은 유효응력구간(0~1kPa)에서는 초기 간극비에 따라 매우 다른 압밀거동 양상을 보이기 때문에 연약지반의 침하거동해석에서 초기 간극비를 정확히 산정하는 것은 매우 중요하다(Znidarcic, 1999). 본 연구에서는 인천 준설토의 초기슬러리 상태의 간극비(e_0)와 초기 간극비(e_{00})의 상관 관계를 실험을 통해 분석하였다. 초기 간극비 산정을 위하여 자중압밀 완료후 표층의 함수비를 측정하는 방법과 전기 비저항 탐침법을 이용하는 방법을 적용하여 인천지역 준설토에 대한 초기 슬러리 간극비와 초기 간극비의 상관 관계식을 제시하였다. 그리고 자중압밀을 지배하는 낮은 유효응력 상태와 높은 유효응력 상태에서의 유효응력-간극비-투수계수를 모두 적절히 고려하기 위해서 일련의 침강압밀 시험-자중압밀시험-CRS압밀시험을 실시하였다. 유효응력이 약 1.0kPa 보다 낮은 응력상태에서는 자중압밀시험을 통해서 유효응력-간극비 관계와 간극비-투수계수 관계를 얻어낼 수 있으며, CRS 압밀시험을 통해 1.0kPa보다 높은 유효응력에서의 유효응력-간극비 관계와 간극비-투수계수 관계를 얻어낼 수 있다. 또한 본 연구에서는 배수조건을 달리 하여 실내 자중압밀시험을 하였으며, 그 실험결과를 토대로 Morris(2002)가 제안한 선형화된 유한변형률 이론해와 비교분석하였다.

2. 선형화된 유한변형 압밀이론

Gibson 등(1981)은 흙의 압축성과 투수성의 비선형 부분을 선형화시켜 다음 식 1과 같은 간략한 형태의 압밀방정식을 제안하였다.

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

여기서, γ_s 는 흙의 단위중량, γ_w 는 물의 단위중량, e 는 간극비, z 는 물의 흐름과 변형에 대한 축소좌표, t 는 시간, g 는 유한변형 압밀이론에 의한 압밀계수, λ 는 fitting계수이다. 또한 Morris(2002)는 실제로 비선형적인 간극비-유효응력 관계를 λ 의 함수로 사용하여 간극비-유효응력 관계를 선형화함으로써 자중압밀에 대한 이론해를 제시하였다. 본 논문에서는 다른 배수조건, 즉 일면배수와 양면배수에 대한 일련의 자중압밀 시험을 하여 Morris(2002)가 제시한 선형화된 유한변형이론의 적용성을 파악하였다. Morris(2002)의 자중압밀에 대한 선형화된 유한변형이론에 의한 무차원 시간계수(T)와 압밀도(U)를 자중압밀 시험결과와 비교를 하기 위해서는 다음과 같은 산정과정의 필요하다

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma') + e_{\infty} \quad (2)$$

$$N = \lambda l (\gamma_s - \gamma_w) \quad (3)$$

여기서, l 은 흙 입자만의 높이, σ' 는 유효응력, e_{00} 는 자중압밀 시작시의 간극비, 즉 초기 간극비를 의미하고 이때의 유효응력이 영이다. e_{∞} 는 자중압밀이 종료된 후 시료 하부 퇴적층의 간극비를 의미한다. 식 2에서 λ 는 fitting계수로서 λ 의 값에 변화를 주어가면서 그래프에 도시하여 실험값과 가장 잘 일치하는 λ 를 찾아 식 3에서 N값을 산정한다. 그리고 간극비-유효응력 관계에서 구해진 유한변형이론에서 압밀계수 g 와 무차원 시간계수 T의 관계는 다음 식 (4)으로 표시 할 수 있다.

$$T = \frac{gt}{l^2} \quad (4)$$

그리고 압밀계수 g 와 투수계수 k 의 관계는 다음 식 (5)로 표시할 수 있다.

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

3. 시험내용 및 방법

3.1 시료의 준비와 물성시험

본 연구에 사용된 시료는 인천지역 준설패립장에서 채취한 해성점토로서 기본 물성치는 다음의 표 1과 같으며 통일분류법에 의하여 CH로 분류되었다. 본 시험에서는 채취한 해성점토를 그대로 사용한 후 염분비 보정식에 의한 함수비 보정을 하였다(Imai et al., 1979).

표. 1. 인천 준설토의 기본물성치

흙의 분류	액성한계 (LL, %)	소성한계 (PL, %)	소성지수 (PI, %)	염분함유율 (%)	비중 (G _s)
CH	55.9	21.9	34.0	2.67%	2.65

표 2는 채취된 준설토 시료에 대해 실시된 XRD 분석결과를 보여준다. 시료 내에 석영(Qtz), 사장석(Pl), 정장석(K-f), 일라이트(III), 고령토(Kln)이 함유되어 있으며, 석영이 전체의 광물구성 중 50.3%로 가장 비율이 높았다. 본 시료 내에는 Montmorillonite가 함유가 되지 않아 점토 입자사이의 확산 이중층구조에 대한 영향은 적을 것이라 판단된다.

표. 2. 인천 준설토의 XRD 분석결과

구 성	Qtz	Pl	K-f	III	Kln
함유량(%)	50.3	19.1	8.6	15.9	6.1

3.2 침강압밀시험

준설토의 침강 및 압밀특성을 파악하기 위하여 그림 1에 제시된 바와 같이, 직경 15cm, 높이 100cm 인 투명 아크릴로 제작되었으며, 측면에는 침강 및 자중압밀이 이루어지는 동안 발생하는 시료내부의 간극수압을 측정할 수 있도록 10cm간격으로 직경 8mm의 구멍을 내고 밸브를 설치하였고, 이를 플라스틱 관으로 piezometer에 연결하였다. 그리고 인천 현장에서 채취한 준설패립토는 교반기를 이용하여 균질하게 교반한 후, 노 건조시켜 함수비를 측정한 후 노 건조 전 염분비에 대하여 함수비를 보정하여 특정의 함수비(500%)를 가진 슬러리 상태로 재성형한다. 침강시험 종료시점은 과잉간극수압의 완전소산과 시간에 따른 계면고의 변화가 없는 시점에서 종료한다.

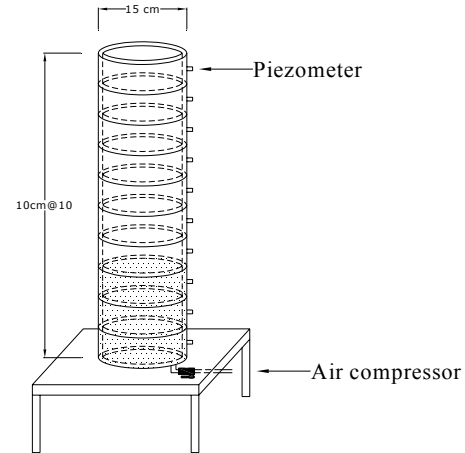


그림 1. 침강압밀 시험장치 구성도

3.3 초기 간극비 산정법

3.3.1 Znidarcic의 산정법

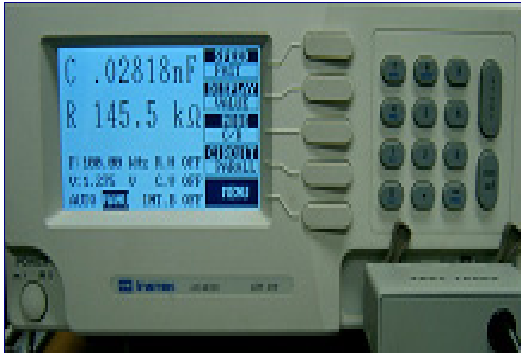
초기 간극비를 산정하기 위하여 자중압밀이 종료된 후 시료의 표면위에 부유물과 상등액을 조심스럽게 제거하고 표면에서의 채취한 시료의 함수비를 측정함으로써 자중압밀이 시작하는 시점의 간극비를 산정할 수 있다. Znidarcic(1999)는 표면에서 시료를 채취하는 과정에서 세심한 주의를 당부했다. Znidarcic의 제안에 따라 표면에서 채취한 시료의 간극비를 유효응력이 존재하지 않고 자중압밀이 시작되는 초기 간극비로 보고 표면에서 채취한 함수비로부터 초기 간극비는 식 6을 통해 산정한다.

$$e_{00} = \frac{w_{00} G_s}{S} \quad (6)$$

여기서, e_{00} 는 초기 간극비, S 는 포화도(침강·자중압밀시험 시 시료는 완전 포화상태이므로 $S=1$), G_s 는 비중, w_{00} 는 초기 함수비를 의미한다.

3.3.2 전기 비저항 탐침법

전기 비저항 시험은 지반에 전류를 흘려 발생하는 전위차를 측정하여 연속적으로 시료의 고유 비저항을 산출하고 이를 통해 시료의 재료적인 특성을 알아내는 방법이다. 자중압밀이 종료된 후 상등액과 부유물을 제거하고 표면의 시료를 직접 채취하여 함수비를 측정하는 Znidarcic(1999)의 방법은 정확성에 한계가 있다. 따라서 초기 간극비를 합리적으로 산정하기 위한 방법으로 전기 비저항 탐침을 적용하였다. 전기 비저항 탐침을 연속적으로 시료에 관입하여 상등액과 시료표면의 경계면을 정확히 파악하고 시료하부에서 측정된 전기 비저항값과 분리형 링타입 자중압밀기를 통해 측정된 시료 하부에서의 간극비 관계를 비교하여 시료표면에서의 간극비, 즉 초기 간극비를 산정하였다. 그림 2 (a)는 전기 비저항 측정을 위한 LCR Meter이며, 전압은 1.275V이고 주파수는 100kHz를 사용하였다. 그림 2 (b)는 본 연구를 위해 제작된 전기 비저항 탐침으로써 two-terminal방식을 사용하여 중심전극과 외부전극에 각각 두 쌍의 동축전선을 연결하여 저항을 측정할 수 있게 하였다. 또한 탐침의 끝단부분은 부식에 강한 스테인레스를 사용하였으며 직경은 4mm이다. 그림 3에는 전기비저항 탐침 측정장치 모식도를 보여주고 있다.



(a) LCR Meter : 전기 저항 측정



(b) 전기 비저항 탐침

그림 2. 전기 비저항 탐침 측정장치

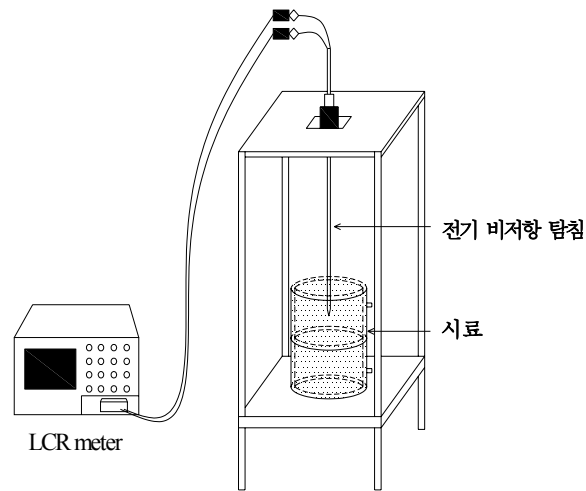


그림 3. 전기저항 탐침 측정 장치 모식도

흙의 특성인 고유 저항 ρ_{soil} 과 전극의 기하학적 형상에 따라 측정되는 저항 R_{soil} 은 식 7과 같이 표현할 수 있다(Lee, 2003).

$$R_{soil} = \alpha \rho_{soil}$$

(7)

여기서, 상수 α 는 입자의 농도를 가진 소금물의 전기 전도도와 저항을 측정함으로써 얻어진다. 포화된 흙의 전기전도도는 입자 전도도와 전해질 전도도 그리고 입자의 비표면적 전도도로 구성되며, 식 8과 같이 표현된다(Lee, 2003).

$$\sigma_{mix} = (1-n)\sigma_p + n\sigma_{el} + (1-n)\frac{\gamma_p}{g}\lambda_{ddl}S_a \quad (8)$$

여기서, σ_{mix} 는 포화된 흙의 전체 전기전도도, σ_p 은 입자의 전기전도도, σ_{el} 은 전해질의 전도도, γ_p 은 단위중량, λ_{ddl} 은 입자의 표면 전도도, S_a 은 입자의 비표면적, n 은 간극률, g 는 중력가속도이다. 해성점 토인 경우 전해질의 전도도가 입자의 전기전도도와 입자의 비표면적 전도도에 비해 매우 크므로 식 8은 식 9로 간략히 표현할 수 있다(Lee, 2003).

$$\sigma_{mix} = n\sigma_{el} \quad (9)$$

또한 Archie(1942)의 경험식은 다음 식 10과 같이 흡입자와 간극수의 고유저항 관계를 비선형으로 표현하였다.

$$\rho_{soil} = \rho_{el} n^{\theta} \quad (10)$$

위 식에서 ρ_{soil} 과 ρ_{el} 은 각각 흡과 간극수의 고유 저항, n 은 간극률이며, θ 는 피팅상수로 약 -1에서 -2.4의 범위의 값을 가진다. 초기 슬러리 간극비(e_0)와 초기 간극비(e_{00})관계를 산정하기 위하여 시료에 대한 전기 비저항 탐침의 보정이 필요하다. 전술했듯이, α 는 임의의 농도를 가진 소금물의 전도도와 전기 비저항 탐침으로 측정된 저항값의 관계에서 산정된다. 자중압밀이 종료된 후에는 링타입 자중 압밀기를 사용하여 깊이별 간극률(n)을 구하고, 전기 비저항 탐침을 통한 깊이별 전기 저항 값을 측정한다. 또한, 간극수의 전도도를 측정하여 식 10을 통해 θ 값을 산정한다. 상등액과 시료표면의 저항 값은 확연히 구분 되므로, 전기 비저항 탐침을 통해 상등액과 시료표면의 정확한 경계면을 파악하여 초기 간극비를 산정한다.

3.4 자중압밀시험

앞서 언급했듯이, 초기 슬러리 함수비(w_0)가 500%인 침강압밀시험을 하여 초기 간극비 산정방법을 통해 자중압밀시험을 실시한다. 자중압밀시 낮은 응력상태(1kPa보다 작은 경우)의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수의 관계를 얻기 위하여 고안된 자중압밀 시험장치의 구성은 그림 4에 제시되어 있다. 자중압밀시험기는 침강시험기와 같이 본체는 15cm 직경으로 하였으며, 재질은 청동으로 사용하였다. 시험방법은 침강압밀시험이 종료된 후 얻어진 시료표면의 초기함수비를 통해 자중압밀시험의 시료를 제작한 후, 시간에 따른 침하량을 관측한다. 자중압밀이 끝난 후 시료의 표면의 상등액 및 부유물을 제거하고 흡반침(가이드)을 자중압밀시험기에 끼워 황동링을 위층부터 차례로 수평방향으로 빼내어 시료가 가이드를 타고 흘러내리도록 하여 채취한다. 이때 수평방향으로 빼낼 때 그 다음 아래층에 있는 시료와 섞이지 않게 주의해야한다. 즉, 깊이별 각 층의 시료를 채취하여 함수비를 측정하여 간극비-유효응력 관계를 얻는다. 앞서 말했듯이, 자중압밀시험기는 각 층별 함수비를 채취하기 위하여 그림 4와 같이 1.5cm 간격으로 분리를 할 수 있도록 고안하였다. 또한 시험을 하기 전 CRS 압밀링을 미리 설치함으로써 자중압밀시험에서 얻을 수 없는 비교적 높은 응력상태의 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 관계를 얻을 수 있다. 자중압밀시험은 일면배수와 양면배수 조건으로 배수조건을 달리하여 실시하였으며, 자중압밀 과정 중 측정된 침하량과 과잉간극수압을 Morris(2002)의 선형화된 유한변형 이론해와 비교분석하였다.

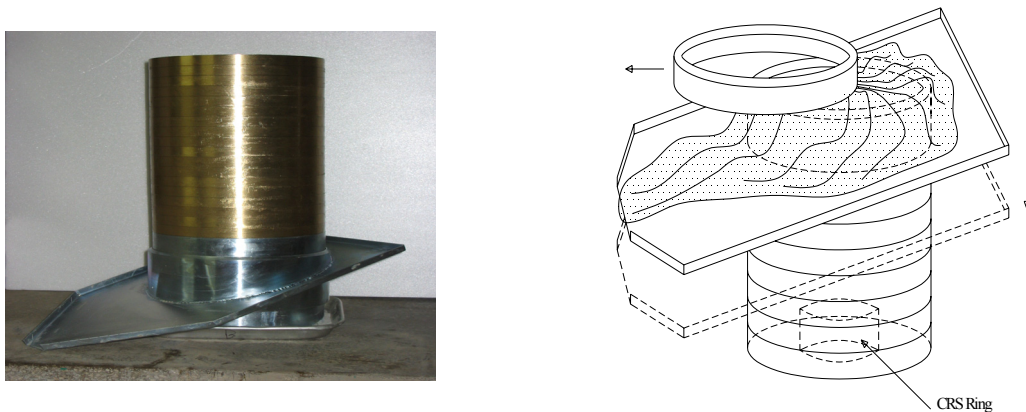


그림 4. 자중압밀 시험 장치

3.5 CRS 압밀시험

자중압밀 시험에서 얻을 수 없는 높은 응력상태(보통 1kPa 이상)의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계를 얻기 위한 CRS 압밀시험기의 기본 제원은 그림 5과 같다. 자중압밀 후 얻어진 시료는 초연약 상태이므로 표준압밀시험으로는 시료의 셋팅과 가압에 문제가 있고, 각 하중단계에서의 투수계수를 산정하기 어렵기 때문에 CRS 압밀시험 방법을 본 연구에 적용하였다. 또한 자중압밀이 끝난 상태의 시료를 채취함으로써 CRS 시험에 사용된 시료는 자중압밀 후 토체의 높이에 해당하는 유효응력만이 작용한다고 볼 수 있다.

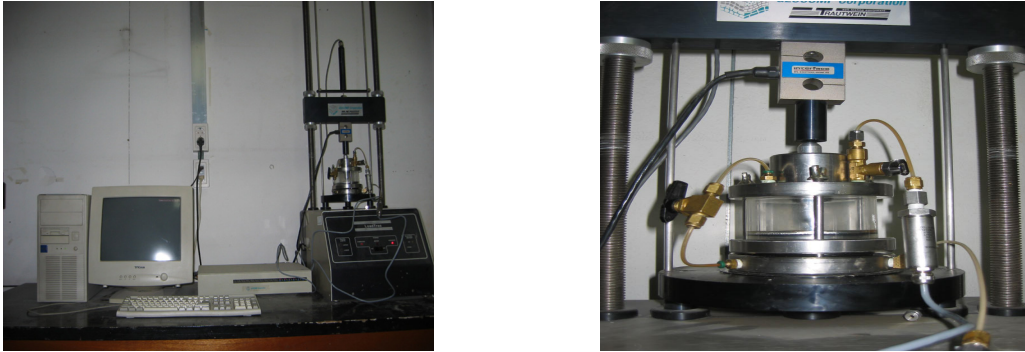


그림 5. CRS 압밀시험기 구성도

4. 실험결과 및 분석

4.1 초기 간극비 산정결과

침강압밀시험이 종료 된 후 직접 시료 표면에서 채취하여 산정한 초기 함수비(혹은 초기 간극비)는 초기 슬러리 함수비 100%, 200%, 300%, 500%, 900%, 1200%, 1500%에 대해서 평균적으로 약 101%, 206%, 231%, 278%, 289%, 301%, 303%로 나타났다. 전기 비저항 탐침법은 탐침의 기하학적인 특성, 재질, 전극의 길이 등에 따라 측정된 저항 값이 달라지므로 식 7을 이용하여 소금물의 전도도와 전기 비저항 탐침으로 측정된 저항 값의 관계로 α 값을 산정하였다. 측정된 전도도와 저항 값의 관계는 그림 6과 같으며 이때의 기울기는 4.925 cm^{-1} 이고 이 값은 전기 비저항 탐침의 α 값으로 사용한다.

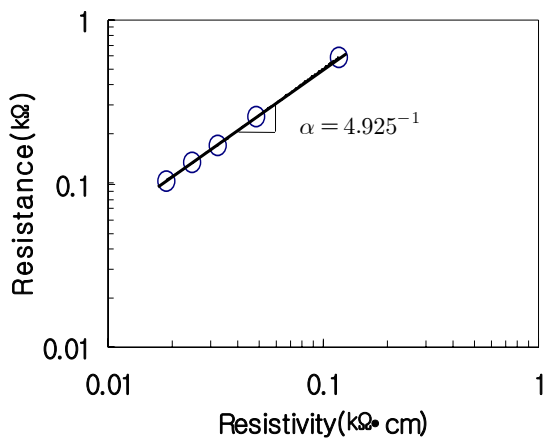


그림 6. 전기 비저항 탐침의 보정(α)

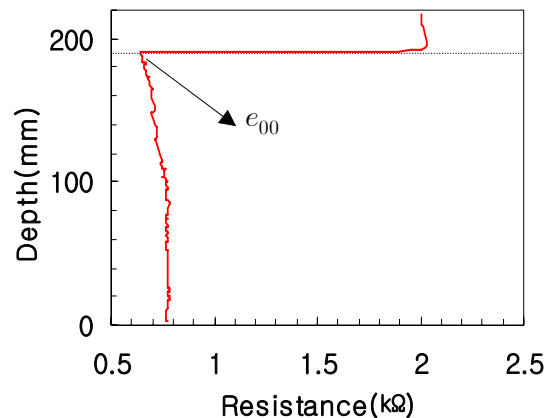


그림 7. 깊이별 저항

그림 7에서 볼 수 있듯이 전기 비저항 탐침를 사용하면 상등액과 시료표면의 경계면을 정확히 파악할 수 있어 경계면에서의 초기 간극비를 정확히 산정할 수 있다. 링타입 자중압밀시험 장치에서 측정된 시료 하부에서의 깊이별 간극률과 전기 비저항 탐침에 의해 측정된 전기 비저항과의 관계를 통해 식 10을 이용하여 θ 를 산정하였다. 채취된 시료의 간극비는 식 6을 이용하여 계산하였으며, 시료는 충분히 포화된 상태이므로 포화도(S)는 1로 가정하였다. 측정된 간극수의 전기 전도도는 9.34 ms/m^3 , 비저항은 $0.107 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ 이며, θ 값은 그림 8에서와 같이 약 -2.18 로 계산되었다. 따라서 계산된 θ 를 식 10에 대입하여 역으로 간극률을 계산할 수 있고 이를 통해 시료 표면의 초기 간극비를 산정할 수 있다. 그림 9는 전기 비저항 탐침법을 사용하여 초기 슬러리 함수비 500%, 900%, 1200%, 1500%에 대한 초기 간극비(e_{00})를 측정된 결과와 초기 슬러리 간극비의 관계를 나타낸다.

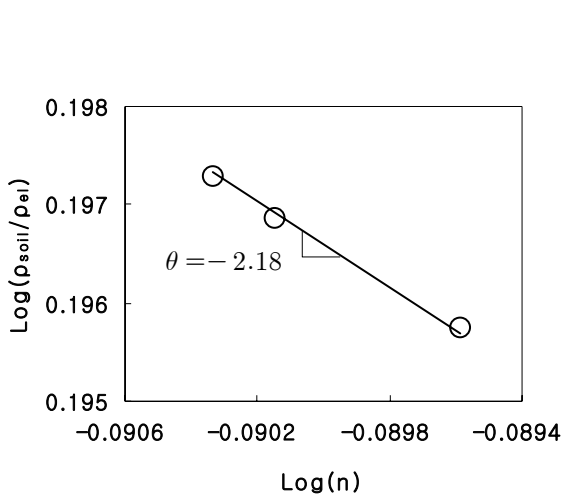


그림 8. 전기 비저항 탐침의 보정(θ)

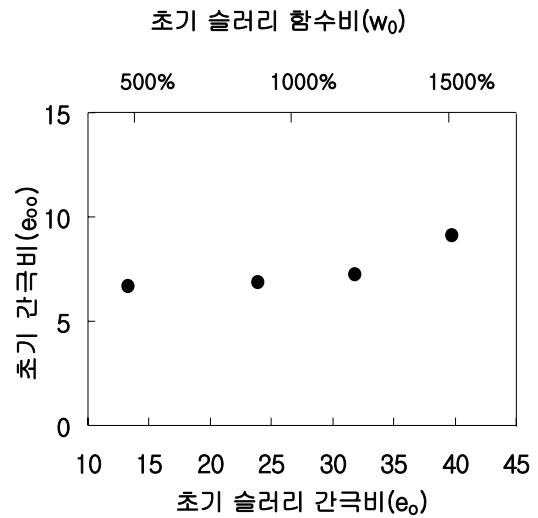


그림 9. 전기 비저항 탐침법에 의한 e_{00} 산정

그림 10은 인천 시료에 대하여 초기 슬러리 함수비(100%~1500%)를 달리하여 침강시험 종료 후 직접 표면의 시료를 채취하는 방법과 전기 비저항 탐침법을 이용하여 구해진 시료 상부 표면의 초기 간극비와 초기 슬러리 간극비 관계를 보여준다.

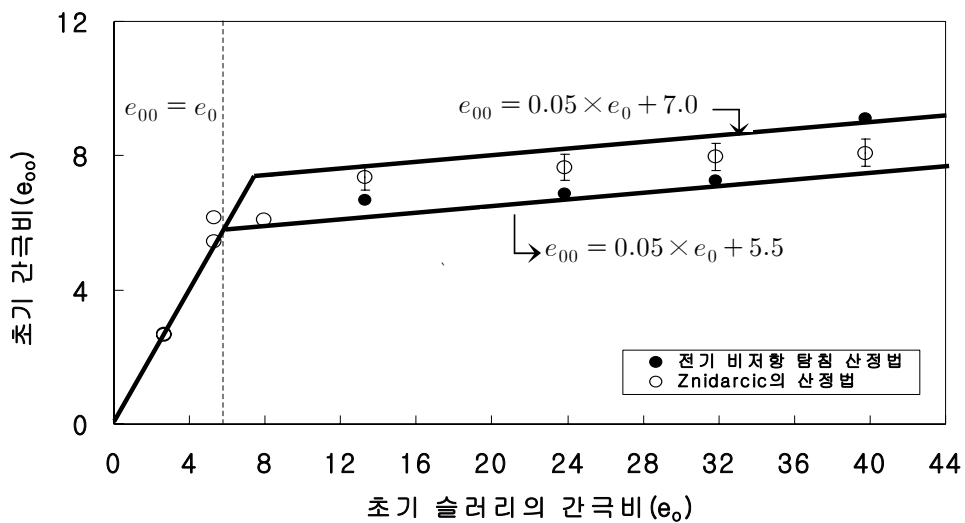


그림 10. 인천지역 준설토에 대한 초기 간극비와 초기슬러리 간극비 관계

그림 10에서 볼 수 있듯이 초기 간극비는 시료에 대한 특정한 토질정수가 아니며 초기 슬러리 간극비에 따라 달라짐을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 낮은 유효응력 상태일 때 초기 슬러리 함수비가 높아서 자유수의 양이 증가하면 확산 이중층이 팽창하여(즉, 확산 이중층이 두꺼워져) 슬러리 입자간의 거리가 늘어나기 때문에 초기 간극비가 다소 커진다고 추정할 수 있다고 보고된다(Znidarcic, 1999). 또한 인천지역 준설토에 대하여 초기 간극비가 약 6까지는 초기 슬러리 간극비와 거의 같은 값을 보이며, 그 이상부터는 식 11과 같이 최소 한계선과 식 12와 같은 최대 한계선 사이에 분포하고 있다(그림 10 참조).

$$e_{00} = 0.05 \times e_0 + 5.5 \quad (11)$$

$$e_{00} = 0.05 \times e_0 + 7.0 \quad (12)$$

이는 Morris(2007)가 모든 초기 슬러리 간극비 구간에서 초기 간극비는 초기 슬러리 간극비와 비슷한 값을 가진다고 발표한 것과는 다른 경향을 보이고 있으며, Znidarcic(1999)가 초기 슬러리 간극비가 8 이상일 경우 유효응력이 영인 상태가 될 때까지 침강이 발생한다고 발표한 것과는 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 그림 10에서 볼 수 있듯이, 초기 슬러리 함수비가 작은 상태는 이미 상부는 초기 간극비보다 작아진 상태에서 침강·자중압밀이 시작하기 때문에 이론상으로는 팽창되어져야 한다. 즉 초기 슬러리 함수비가 약 200%이하에서 침강·자중압밀시험을 수행한다면 시험이 종료된 후 시료 표면의 초기 함수비(혹은 초기 간극비)는 초기 슬러리 함수비(200%)보다 큰 초기 간극비가 예측된다. 하지만 본 시험결과에서는 간극비가 6($w_0 = 226\%$)까지는 초기 슬러리 간극비와 초기 간극비가 일치하는 경향을 보여주고 있다. 따라서, 예상되는 초기 간극비보다 작은 초기 슬러리 간극비에서의 자중압밀(혹은 팽창) 거동은 향후 반복시험을 통해 데이터가 축적된 후에 명확한 해석이 가능할 것이다.

4.2 자중압밀 시험결과

초기 슬러리 함수비가 500%인 침강압밀시험이 종료된 후 산정한 초기 간극비로 자중압밀 시험을 실시해 시간 경과에 따른 계면고 높이와 과잉간극수압 소산 경향을 얻을 수 있다. 그림 11은 시간 경과에 따른 계면고 높이 변화를 보여주며, 배수거리에 따른 효과로 인하여 양면배수조건이 일면배수 조건에 비해 압밀속도가 상당히 빠름을 확인할 수 있다. 본 인천시료의 경우에는 압밀종료(95%) 기준으로 약 압밀속도가 3.7배 차이로 보인다. 시간에 따른 시료 깊이별 과잉간극수압의 분포는 그림 12에 각각 일면배수(a)와 양면배수(b)에 대하여 나타냈다. 그림 12에서 보듯이 일면배수와 양면배수의 과잉간극수압 소산속도를 비교하면 양면배수 경우가 훨씬 빠른 경향을 보여주고 있으며, 일면배수와 달리 상부와 하부 모두에서 과잉간극수압 소산이 빠르게 진행됨을 보여주고 있다.

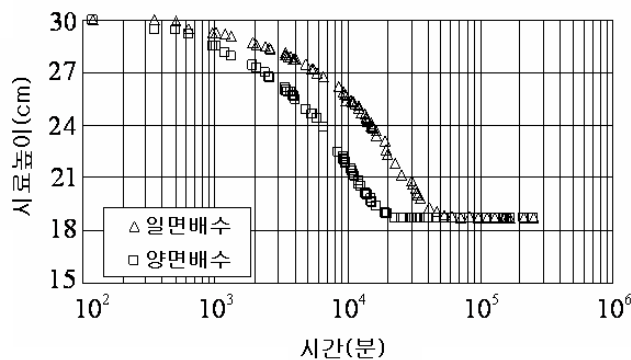


그림 11. 시간에 따른 자중압밀곡선(일면배수, 양면배수)

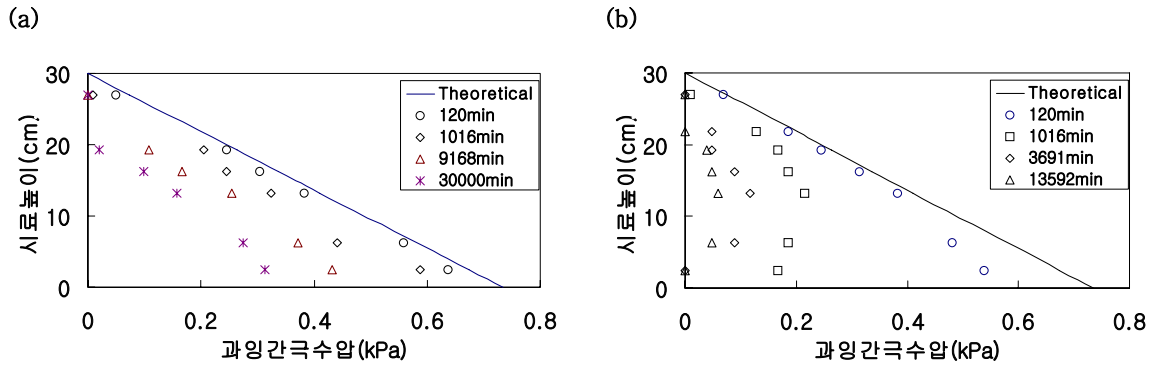


그림 12. 시간에 따른 깊이별 과잉간극수압 분포 : (a) 일면배수 ; (b) 양면배수

자중압밀시험 종료 후, 앞서 언급한 흡반침(가이드)를 사용하여 깊이별 시료를 채취하고 시료의 깊이별 함수비(간극비) 분포를 측정하여 유효응력이 1kPa 미만인 구간의 간극비와 유효응력의 관계를 그림 13에 나타내었다. 자중압밀 과정에서 배수조건은 시료의 간극비와 유효응력 관계에는 영향을 주지 못하므로 일면배수와 양면배수 조건 모두 유효응력과 간극비 관계가 거의 일치하는 것을 실험결과를 통해 확인할 수 있다. 그림 11의 압밀속도 비교와 그림 13에서 볼 수 있듯이 배수조건에 상관없이 준설토의 고유한 간극비와 유효응력의 관계는 실내 자중압밀 시험을 수행할 경우 일면배수에 비하여 양면배수 조건이 상당히 시간 효율적임을 알 수 있다.

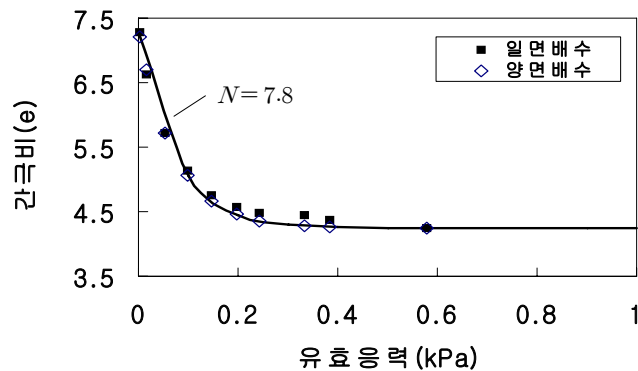


그림 13. 유효응력-간극비 관계(일면배수,양면배수)

Morris(2002)는 자중압밀에 대한 선형화된 유한변형이론에 의한 무차원 시간계수(T)와 압밀도(U)의 관계를 앞서 언급한 N값에 따라 그림 14과 같이 나타내었고, 본 논문에서는 자중압밀시험결과(일면배수, 양면배수)에 대한 시간계수와 압밀도와 함께 그림 14에 비교하였다. 자중압밀시험을 통해 구한 λ 값은 13.3이며, $N=7.8$ 이다. 그림 14에서 보듯이, 시간계수(T)와 압밀도(U)의 이론적 해와 유사한 경향을 보여준다. 실내 자중압밀시험을 통하여 주어진 시료의 N값을 산정하면 Morris(2002)가 제안한 선형화된 유한변형 압밀해를 이용하여 준설토의 자중 및 재하하중에 의한 압밀거동을 예측할 수 있다.

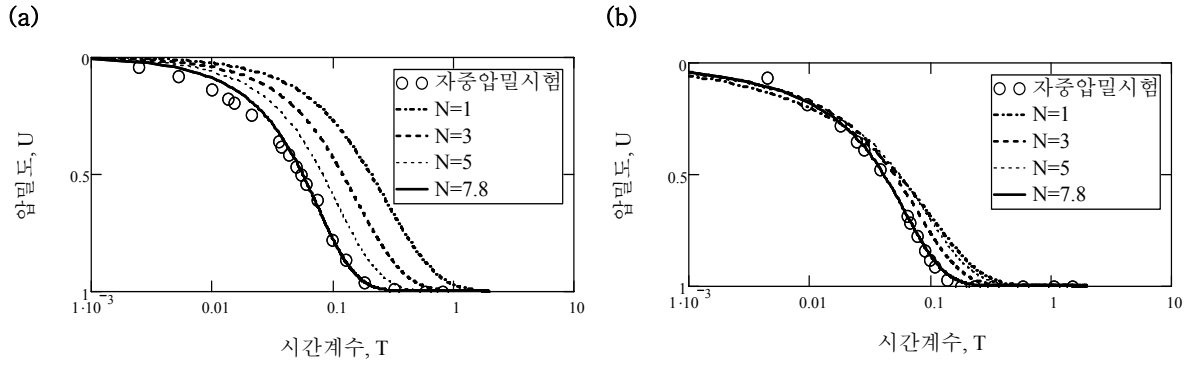


그림 14. Morris의 자중압밀의 시간계수에 대한 압밀도 : (a) 일면배수 ; (b) 양면배수

4.3 전응력 구간에 대한 간극비-유효응력-투수계수 관계

자중압밀 실험에서는 유효응력이 약 1.0kPa 보다 낮은 응력상태에서의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수의 관계를 얻어낼 수 있으며, CRS 압밀시험은 1.0kPa보다 높은 유효응력에서의 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계를 얻어낼 수 있다. 일련의 실험결과들을 결합하여 준설매립 현장에서 발생할 수 있는 유효응력 범위내에서의 간극비 관계를 해석에 적용해야 한다(최항석 등, 2007). 자중압밀 시험과 CRS압밀 시험 결과를 통해 얻어진 간극비-유효응력 관계와 간극비-투수계수 관계를 결합하여 준설매립장에 예상되는 응력구간에 대해 하나의 그래프로 표시하면 그림 15와 같은 구성관계를 구할 수 있다. 본 구성관계는 비선형 유한변형 압밀이론을 적용하기 위한 중요한 인자로서 PSDDF와 같은 유한변형 압밀해석 프로그램의 입력 데이터로 사용할 수 있다. 또한 구성관계는 식 13과 식 14로 근사화하여 나타낼 수 있다.

$$\text{간극비} - \text{유효응력 관계} : e = 3.8\sigma^{-0.14} \quad (13)$$

$$\text{간극비} - \text{투수계수 관계} : k = 3.5 \times 10^{-6} e^{4.6}$$

(14)

여기서 $\sigma = kPa$, $k = m/day$ 이다.

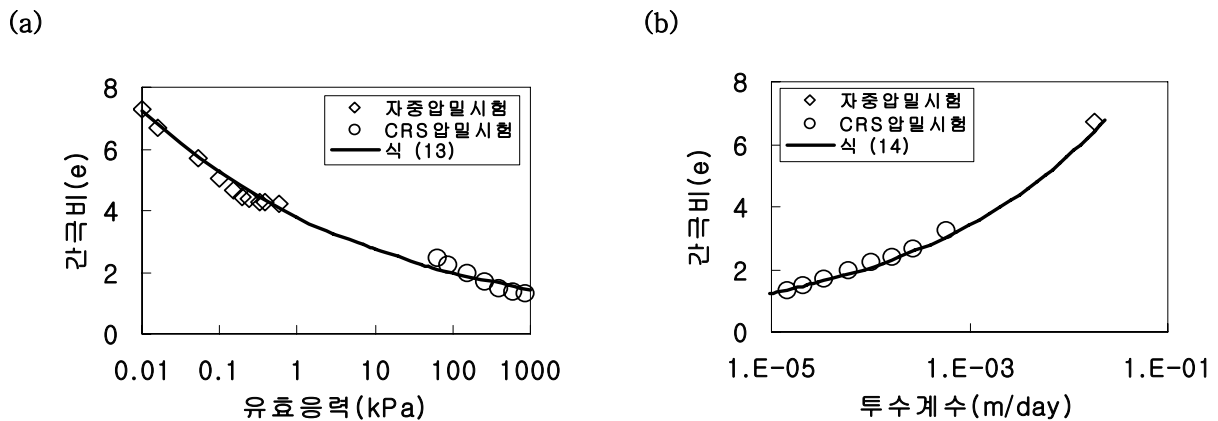


그림 15. 전 응력구간에서의 구성관계 : (a) 간극비-유효응력 관계 ; (b) 간극비-투수계수 관계

5. PSDDF 적용

실제 준설매립 과정에서는 상부에서의 침강과 하부에서의 자중압밀이 동시에 발생하나 보통 압밀시간에 비해 침강시간이 상당히 짧으므로 PSDDF 프로그램에서 침강거동을 고려하지 않고 자중압밀만 해석해서 고려한다. 그림 16은 PSDDF 프로그램에서 단계 매립시 각 층의 자중압밀 시점인 초기 간극비와 압밀 종료 후 간극비의 깊이별 분포가 도식되어 있다. 그림 16에서 볼 수 있듯이, 자중압밀은 각 단계 매립층의 초기 간극비로부터 시작이 되며 단계 매립 전 층의 간극비는 변화게 된다. 즉 해석상에서 단계매립이 진행될 때 매립 직후 각 매립층은 초기 간극비를 갖는다고 가정한다.

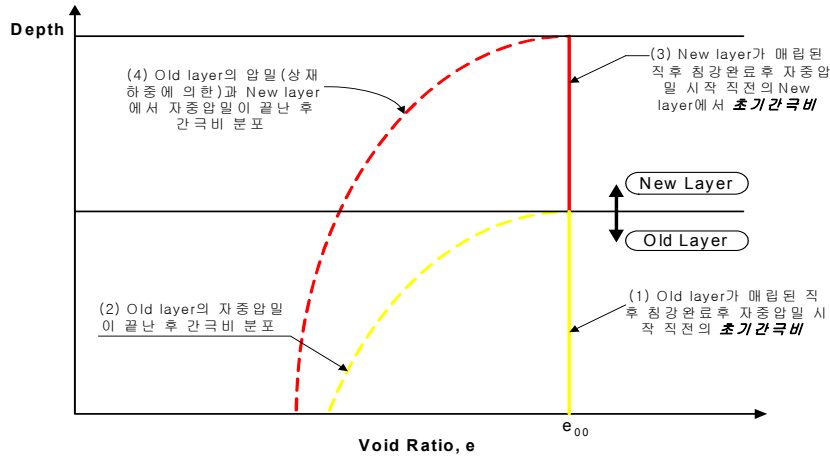


그림 16. 깊이별 간극비 분포

PSDDF 프로그램을 이용하여 준설 매립장의 침하 거동을 예측하기 위해서는 실제 펌핑된 준설토 투기량(혹은 투기높이)을 슬러리의 초기 함수비에 대한 자중압밀 시점인 간극비를 산정한 후, 식 15를 이용하여 초기 간극비에 해당하는 투기높이(L_{00})를 프로그램에 입력치로 적용해야 한다. 예를 들어 1개월 기준으로 슬러리 함수비(혹은 슬러리 간극비) 상태의 투기 높이가 L_0 의 준설토를 펌핑한다면 식 15를 이용하여 초기 간극비에 해당하는 투기 높이(L_{00})를 산정할 수 있다.

$$L_{00} = \frac{1 + e_{00}}{1 + e_0} L_0$$

(15)

여기서 L_{00} 는 초기 간극비에 해당하는 PSDDF 프로그램 입력용 투기높이, L_0 는 실제 펌핑된 초기 슬러리 투기 높이를 의미한다. 본 절의 PSDDF 적용성 검토에서는 그림 15에 제시된 인천지역 준설토의 간극비-유효응력관계와 간극비-투수계수 관계를 PSDDF의 입력값으로 사용하였다. 그림 17은 펌핑량을 매 단계매립 시 2.4m씩 1년간 5단계 매립을 한 경우 PSDDF 프로그램을 이용하여 간극비의 변화를 도식한 것이다. 이 경우 실제 펌핑된 초기 슬러리 간극비와 투기 높이는 각각 13.25, 4.15m이며, 측정된 초기 간극비는 7.24이었다. 그림 17은 각 매립 단계에 대한 초기 간극비(자중압밀의 시작점)로부터 깊이별 간극비의 분포와 2년이 경과한 후의 간극비 분포를 보여준다. 매립 완료 후 표층의 간극비는 유효응력이 존재하지 않으므로 $e_{00} = 7.24$ 가 계속 유지됨을 확인할 수 있다.

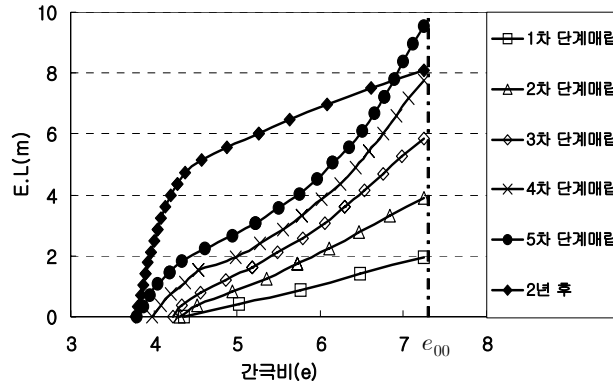


그림 17. PSDDF 해석 결과(깊이별 간극비 분포)

6. 결론

본 연구에서는 인천 준설토에 대한 일련의 침강압밀시험, 초기 간극비 측정시험, 자중압밀시험, CRS 압밀시험 및 Morris(2002)의 선형화된 유한변형 압밀해를 통해 인천 준설토의 침강 및 압밀 특성을 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 인천지역 준설토의 경우 침강·자중압밀시험 결과 초기슬러리 간극비가 약 6까지는 초기 간극비와 일치하는 경향이 보이며, 그 이상부터는 최대한계선($e_{00} = 0.05 \times e_0 + 7$)과 최소한계선($e_{00} = 0.05 \times e_0 + 5.5$) 사이에 분포하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 Morris(2007)가 제안한 초기 간극비와 초기 슬러리 간극비가 거의 동일한 값을 보이는 경향과는 다른 경향을 보이고 있다.
2. 자중압밀에 대한 일면배수와 양면배수의 실험결과 자중압밀종료가 일면배수 조건에 비해 압밀종료(약 95% 압밀도) 기준으로 약 3.7배정도 빠르게 나타났으며, 과잉간극수압 소산에서도 양면배수일 경우가 일면배수일 경우보다 더 빠르게 소산되는 경향을 보인다. 또한 실내 자중압밀시험을 통해서 배수조건에 상관없이 준설토의 고유한 간극비와 유효응력의 관계가 일치함을 알 수 있다.
3. 자중압밀시험 결과에 대한 시간계수(T)-압밀도(U)의 관계와 Morris(2002)가 제안한 선형화된 유한변형 압밀이론해가 주어진 응력-변형률 관계에서 얻어진 N값에 대해 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 어느 특정 준설토의 N값을 산정한다면 Morris(2002)의 제안식에 의해 자중에 의한 압밀거동을 예측할 수 있을 것이다.
4. 자중 압밀이 시작하는 시작점은 초기 간극비이며, PSDDF 프로그램을 이용한 단계매립 해석을 실시한 결과에서도 초기 간극비에서 부터 자중압밀이 시작되는 것을 보여준다. PSDDF 프로그램 해석 시 입력치인 각 단계 투기높이는 실제 펌핑된 투기높이와 측정된 초기 슬러리 간극비로부터 환산하여 구한 초기 간극비에 해당하는 수정된 투기높이를 적용해야 한다.

참고문헌

1. 최항석, 옥영석, 이철호, 이종선 (2007), “인천지역 준설토의 압밀특성 분석과 현장매립 상태 예측방법 연구”, 준설토매립 기술위원회 학술발표회 논문집, 교총회관, 서울, 8월 24일, pp 95-104

2. 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.
3. Cargill, K.W. (1982). "Consolidation of Soft Layers by Finite Strain Analysis," Miscellaneous Paper GL-82-3, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
4. 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, 17(3), 261-273.
5. Gibson, R. E., Schiffman, R. L., and Cargill, K. W. (1981). "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays. II. Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers." Can. Geotech. J., 18(2), 280-293.
6. 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.
7. Lee, J. S. (2003) High resolution geophysical techniques for small-scale soil model testing. Ph.D. Thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
8. Mikasa, M. (1965). "The consolidation of soft clay: a new consolidation theory and its application." Japan Society of Civil Engineering, 1965
9. Morris, P. H. (2002). "Analytical solutions of linear finite-strain one-dimensional consolidation." Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 128(4), 319-326.
10. Morris, P. H. (2007). "Correlations for zero effective stress void ratio of fine-grained marine and riverine sediments." Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering., 133(4), 305-308.
11. Stark, T. D., Choi, H., and Schroeder, P. R. (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
12. 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
13. 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.