

초연약 점토의 구성관계 산정에 관한 실험적 연구

A Experimental study for obtaining material function of very soft clay

이 송¹⁾, Lee-song, 강명찬²⁾, Kang myung chan,

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul

SYNOPSIS : Dredged and reclaimed soft clays form slurry state which is very high water content and very low shear strength, experience large self-weight consolidation, nonlinear compressibility and permeability phenomenon would take place. In this case, a material functions which represent variety effective stress-void ratio-permeability relation(especially very low effective stress), are should be determined to predict nonlinear finite strain consolidation phenomenon forehand.

In this study, large slurry consolidometer with a 380mm diameter and a 1400mm height which is able to consolidation and permeability test, was developed to determine material function of very soft clay. with a 500% initial water content clay, self-weight consolidation and low stress level consolidation (1Kpa, 3Kpa, 6Kpa, 12Kpa) was conducted and after each consolidation step permeability test also conducted. after final consolidation step, a constant rate of strain consolidation was conducted with undisturbed sample obtained from the large consolidometer.

On the above result, material function was determined and laboratory test was modelled to evaluate its validity, numerical analysis on th field was compared to other method.

Key words : self-weight consolidation, nonlinear compressibility and permeability, large slurry consolidometer, finite strain consolidation

1. 서 론

Gibson et al (1967)에 의해 처음으로 소개된 유한변형을 압밀이론은 각 유효응력 단계별 압축성과 투수성의 변화를 고려한 것으로 기존의 Terzaghi 압밀이론에서의 유효응력과 공극비의 관계를 압축계수 (a_v)로 표현하여 압밀 진행에 있어서 일정한 상수로 고려한 단점을 극복하고자 하였다. 준설·매립에 의해 형성된 초연약지반의 경우 초기함수비가 매우 높고, 지반강도가 거의 발현되지 않는 슬러리 상태로 외부하중이 작용하지 않아도 자중에 의한 큰 침하가 발생하게 되고 압밀 진행에 따른 압축성과 투수성이 비선형적 변화를 보이게 되며, 지반의 초기함수비가 높을수록 그 비선형성이 증가된다는 사실이 문헌 및 연구결과를 통해 발표되었다.

이와 같은 비선형 유한변형압밀 현상을 예측하기 위한 가장 기본적이며, 필요한 사항이 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수의 관계일 것이다. 기존의 고전압밀이론에서는 이들의 관계를 압축지수 c_c 및 압밀계수 c_v 의 단일한 상수로 고려하여 압밀현상 예측에 이용하였으며, 이러한 가정은 작은 압밀침하량 즉, 초기상태에서 최종 압밀종료시까지 지반이 경험하는 유효응력의 범위가 작은 경우에 국한된다. 그러나 위와 같은 초연약지반이 자중에 의한 압밀이 진행되는 경우, 지반이 경험하게 되는 유효응력의

범위는 크게 되고, 압밀 현상을 예측하기 위한 압밀정수들을 일정한 상수로 하여 해석하는대는 상당한 무리가 따른다고 할 수 있다. 즉, 비선형적인 압밀침하현상의 예측을 위해서는 다양한 유효응력(특히 매우 작은 값의 유효응력)에 따른 간극비 및 투수계수의 관계를 표현할 수 있는 재료의 구성관계(Material Function)의 정립이 선행되어야 할 것이다.

2 이론적 배경

2.1 유한변형을 압밀이론

Gibson, England, Hussey(1967)는 압축성과 투수성의 변화를 고려하고 Darcy 법칙을 흙 골격과 간극수의 상대속도로 전환하여 포화된 층두께가 비교적 적은점토(자중은 상재하중에 비해 무시할만 하다) 층에 대한 1차원 유한 변형을 압밀이론을 제안하였다. 또한 Gibson et al (1981) 초기에 충분히 자중에 의해 압밀되고, 큰 변형이 발생하는 두꺼운 점토층에 대한 유한 변형압밀이론을 발표하였다. Gibson의 압밀이론은 운동량 보존의 법칙과 연속방정식에 의해서 식 2.1과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\rho_f(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] \pm (\rho_s - \rho_f) \left(\frac{k(e)}{\rho_f(1+e)} \right) \frac{\partial e}{\partial z} \quad (2.1)$$

위의 식은 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 관계에 대해 특정의 제한조건 없이 유효응력과 투수계수의 변화를 간극비의 함수로 표현함으로써 임의의 비선형 구성관계에 대하여도 적용 가능한 비선형 압밀지배방정식이며, reduced좌표로 구성식을 표현함으로써 Convective 좌표로 변환이 가능할 뿐 아니라 점토층의 압밀에 의한 변형률의 크기에 제한을 받지 않는 유한 변형률 압밀 지배방정식의 형태를 지니고 있다.

상기식은 자중에 의한 압밀효과를 나타낸 두 번째항과 상재하중에 의한 압밀효과를 나타내는 첫 번째항으로 구성되어 있으며, 시료의 두께가 작은 실내 압밀시험이나 현장조건에서 상재하중의 크기가 점토층의 자중의 크기보다 큰 경우 두 번째 항을 무시할 수 있다. 압밀계수의 역할을 하는 식 2.2와 간극비와 유효응력의 관계를 나타내는 식 2.3을 상수로 가정하여 식 2.4와 같이 선형화 시킬 수 있다.

$$g(e) = \frac{-k(e)}{\rho_f} \frac{1}{(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \quad (2.2)$$

$$\lambda(e) = -\frac{d}{de} \left(\frac{de}{d\sigma'} \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[g(e) \frac{\partial e}{\partial z} \right] \pm f(e) \frac{\partial e}{\partial z} = -\frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.4)$$

2.1 Material function

2.1.1 유효응력- 간극비 관계

Gibson등(1981)은 간극비 유효응력의 관계를 일정한 함수형태로 나타내는 대신 식 2.2, 식2.3으로 정의되는 비선형 계수 $g(e)$, $\lambda(e)$ 를 통해 간극비와 유효응력의 관계를 압밀해석에 도입했으나, 이 비선형 계수 또한 고정된 상수가 아니라 유효응력에 단계에 따라 변화하는 변수이므로 이러한 비선형성을 압밀예측에 충분히

반영하기 위해서는 간극비-유효응력의 관계를 일정한 함수의 형태로 표현하는 것이 필요하다.

Koppula(1970), Koppula and Morgenstern(1982)은 식2.5와 같은, Somogyi(1980)는 식2.6과 같은 관계를 제안하였다. 또한 Gibson등(1981)은 다양한 실내실험을 통해 얻은 유효응력과 간극비의 관계를 식2.7과 같이 압밀 진행전의 간극비와 압밀 종료후의 간극비와 관계를 바탕으로 지수형태와 유사하게 표현된 경험식을 제안하였다.

$$\frac{de}{d\sigma'} = \left(\frac{de}{d\sigma'} \right)_0 \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^p \quad (2.5)$$

여기서, $\left(\frac{de}{d\sigma'} \right)_0$: 임의의 초기 값

p : 경험적 상수 (0~-1)

$$e = A\sigma'^B \quad (2.6)$$

여기서, A, B : Curve fitted constants

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \cdot \sigma') + e_{\infty} \quad (2.7)$$

여기서, e_{00} : 압밀 시작전의 간극비

e_{∞} : 압밀 종료 시의 간극비

2.1.2 간극비-투수계수 관계

초기 지반상태가 매우 연약한 고함수비의 상당히 큰 간극비를 나타내는 경우에 있어서 간극비 단계에 따른 투수계수는 상당한 비선형성을 보임이 기존의 연구결과에 의해 입증이 되었고, 이들의 비선형 관계를 표현하기 위한 기존의 대표적인 연구결과를 살펴보면 다음과 같다.

Koppula(1970), Koppula and Morgenstern(1982)은 식(2.8)와 같은 관계를, Somogyi(1980)는 식(2.9)와 같은 관계를 제안하였고, 그 외 실험을 통해 얻은 관계를 다항식의 형태로 표현하여 사용하기도 한다.

$$\frac{k}{1+e} = \left(\frac{k}{1+e} \right)_0 \left(\frac{\sigma'}{\sigma'_0} \right)^p \quad (2.8)$$

$$e = C\sigma'^D \quad (2.9)$$

여기서, C, D : Curve fitted constants

3 구성관계의 산정

3.1 실험개요

본 연구에서는 준설시료의 간극비-투수계수의 구성관계를 파악하기 위하여 그림 3.1과 같은 압밀 및 투수실험을 수행할 수 있는 직경 380mm, 높이 140cm의 대형 슬러리 압밀시험기를 제작하였다. 실험장치는 크게 원통형 셀, 간극수압 측정장치, 침하량 측정장치, 압력시스템으로 구성된다. 시험 절차로는 초기 함수비 500%인 준설토를 제조, 투기하여 자중압밀을 실시하고, 이후 형성된 경계면을 측정하여 자중압밀 침하량을 기록하였고, 이후 상부실린더를 제거하여 하중장치를 결합하여 1Kpa, 3Kpa, 6Kpa, 12Kpa, 저응력을 재하하여 일면 배수에 의한 압밀 실험을 실시하였다. 자중압밀 및 각 재하압밀 종료 후 압력시스템을 이용하여 상·하부의 수두차를 일정하게 유지함으로써 하부에서 상부로 흐름을 발생시켜 정수두 투수시험을 실시하였고, 최종압밀 종료 시 시료를 추출하여 연속재하 압밀시험(CRS)을 실시하였다. 투수계수의 산정은 Darcy의 법칙을 이용하여 산정하였고 이때 유속은 투수시험시 측정된 유속이 수렴되는 값을 이용하여 식 3.1을 이용하여 산정 하였고, 시료의 공극비는 초기 실린더 내의 실질 토량과 바탕으로 식 3.2를 이용하여 평균 간극비를 산정 할 수 있다.

$$k = \frac{v}{i} \quad (3.1)$$

여기서, v : 유속
 i : 동수경사

$$e = \frac{H - H_s}{H_s} \quad (3.2)$$

여기서, H : 임의 시간에서의 높이
 H_s : 실질토량고 (흡입자만의 높이)

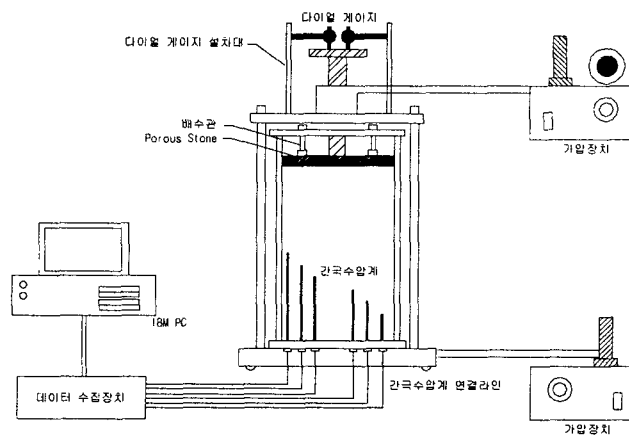


그림 3.1 저응력 압밀시험기

3.2 실험결과

압밀 실험은 초기함수비 500%의 시료에 대해 자중압밀, 1Kpa, 3Kpa, 6Kpa, 12Kpa, 재하압밀을 실시하였고 최종완료후, 연속재하 압밀을 실시하였다. 그림 3.2, 그림 3.3은 이 결과를 보여주고 있다. 이 결과를 바탕으로 Asaoka 방법을 이용하여 실험종료시의 압밀도를 평가하고 압밀 종료후의 유효응력을 산정하였고, 압밀종료시의 높이와 실질토량고를 바탕으로 평균간극비를 산정 하였다. 저응력 압밀시험을 통해서 산정된 유효응력 및 간극비 관계는 표 3.1과 같다.

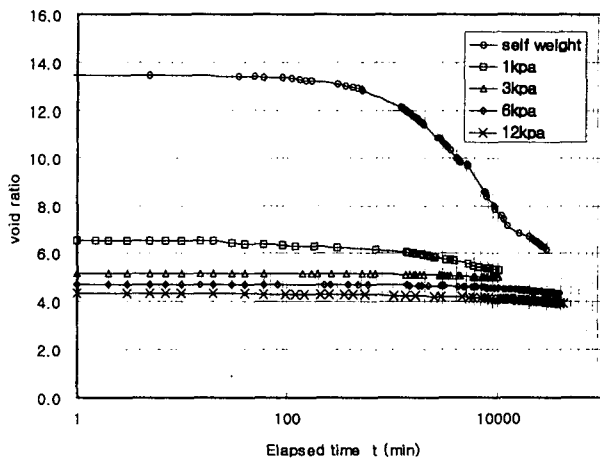


그림 3.2 압밀단계별 시간- 간극비 관계 (저응력 압밀)

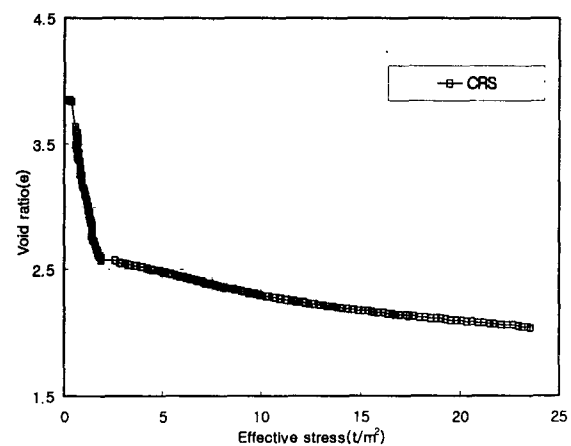


그림 3.3 유효응력-간극비 관계(CRS)

표 3.1 압밀단계별 유효응력 및 간극비

하중단계	재하압밀응력(t/m ²)	압밀도(%)	유효응력(t/m ²)	간극비
자중압밀	0.068	91.5	0.062	6.2
1단계	0.1	95.0	0.095	5.3
2단계	0.3	94.8	0.2844	4.7
3단계	0.6	93.8	0.5628	4.32
4단계	1.2	96.1	1.1532	3.96

투수시험의 경우 각 단계의 압밀종료 시 압밀응력이하의 수두차를 상·부에 형성시켜 투수시험을 실시하였고, 그림 3.4와 같이 측정된 유속이 정적상태(steady flow)인 경우의 값을 바탕으로 Darcy의 법칙을 이용하여 투수계수를 산정하였다. 이 결과는 표3.2와 같다.

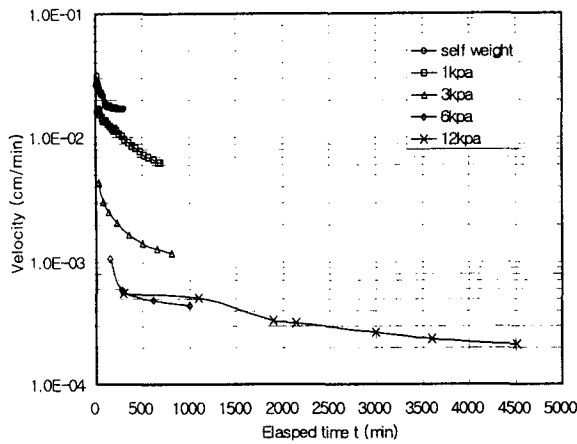


그림 3.4 각 단계별 시간- 유속 관계

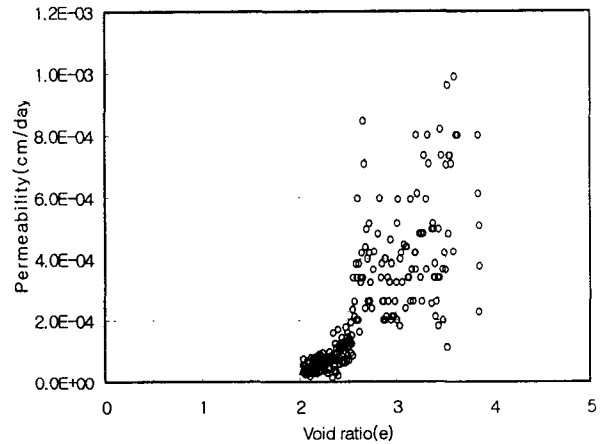


그림 3.5 간극비- 투수계수 관계(CRS)

표 3.2 투수시험단계별 간극비 -투수계수

시험단계	동수경사	유속(cm/min)	투수계수(m/day)	간극비
자중압밀종료	1.68	1.85E-02	1.59.E-01	6.2
1단계압밀 종료	1.92	6.27E-03	4.28.E-02	5.3
2단계압밀종료	2.11	1.16E-03	7.92.E-03	4.7
3단계압밀 종료	2.34	4.88E-04	3.01.E-03	4.32
4단계압밀 종료	2.44	2.10E-04	1.25.E-03	3.96

3.3 구성관계

유효응력- 간극비 관계는 저응력압밀 시험과 일정변형률 압밀 실험결과를 바탕으로 그림3.6과 같은 $e = 3.0494\sigma'^{-0.1181}$ 의 누승함수 형태의 관계를 얻을 수 있었고, 이러한 관계식을 바탕으로 그림 3.7과 같은 회귀분석곡선을 최종적인 유효응력- 간극비의 관계곡선으로 이용하였다.

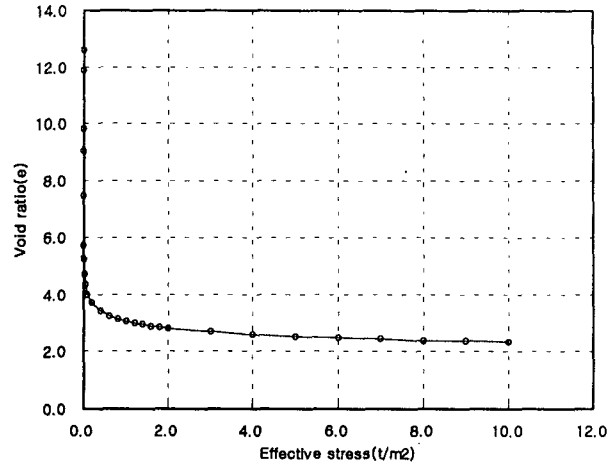
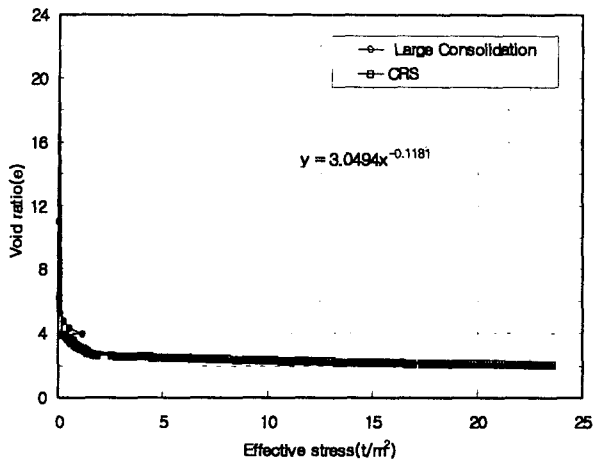


그림 3.6 유효응력- 간극비의 관계(실험값) 그림 3.7 유효응력- 간극비의 관계(Regression curve)

간극비-투수계수 또한 저응력압밀 시험과 일정변형을 압밀 실험결과를 바탕으로 그림3.8과 같이 $k(e) = 8E-07e^{5.4059}$ 의 누승함수 형태를 얻을 수 있었고, 이 함수식을 바탕으로 그림 3.9와 같은 최종적인 간극비-투수계수의 관계곡선을 해석에 이용하였다.

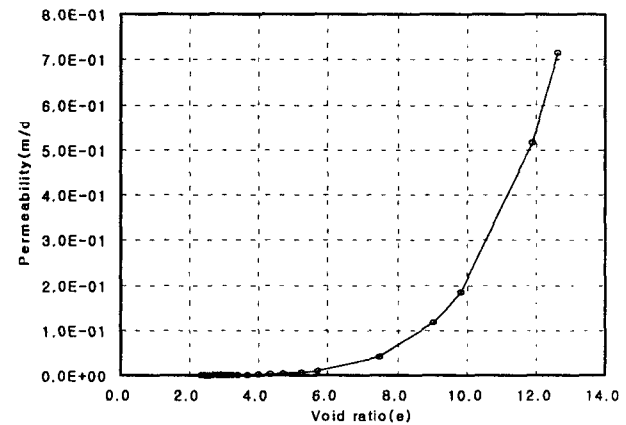
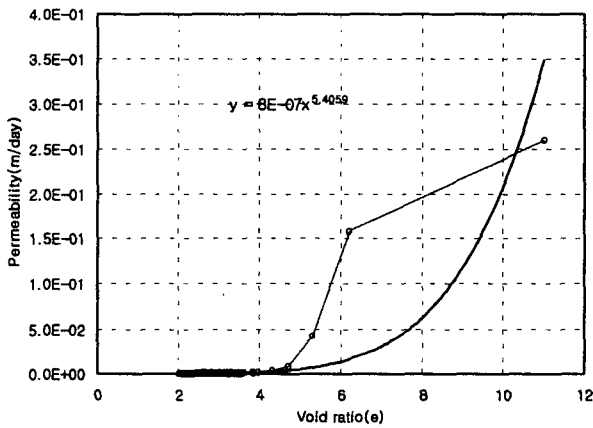


그림 3.8 간극비- 투수계수 관계(실험값)

그림 3.9 간극비-투수계수 관계(Regression curve)

4 수치해석

현장 조건에 대한 해석을 실시하기 이전에 실내에서 결정된 구성관계의 타당성을 검증하기 위하여 함수비 566%의 단계투기 시험중 10cm/day의 결과와의 비교를 통해 입력변수의 타당성을 검증하였다. 그림 4.1은 이에 대한 결과를 나타내고 있으며 좋은 일치율을 확인할 수 있었다.

현장투기완료후의 체적변화비를 예측하기 위하여 단계투기에 의한 방법 그리고 수치해석을 실시하였다. 현장 계획고 6.74m의 경우, 초기함수비 566%로서 실시된 단계투기법에 의한 예측과 수치해석결과는 그림 4.2와 같다.

단계투기의 경우 각 투기속도별로 1년경과시 체적변화비는 1.66, 1.70, 1.84, 1.95의 값을 나타냈고, 수치해석의 경우 1년경과시 1.55의 값을 나타내어 수치해석결과가 다소 작게 산정 되었다. 또한 자중압밀 종료시점으로 추정되는 730일 경과시 단계투기법은 투기속도별로, 1.35, 1.51, 1.69, 1.82의 값을 나타냈고,

수치해석의 경우 1.38로서 단계투기의 10cm/day의 결과와 유사하게 나타났다.

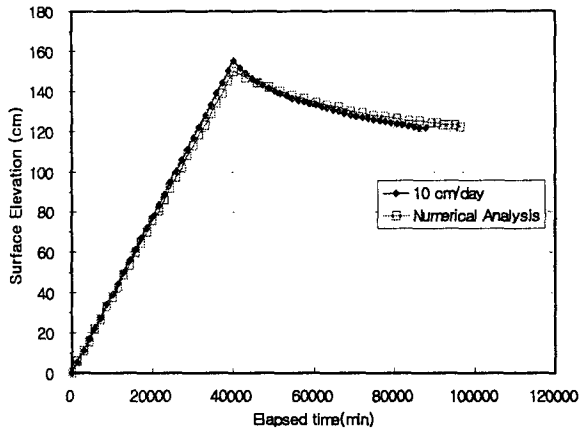


그림 4.1 수치해석결과와 실내시험과의 비교

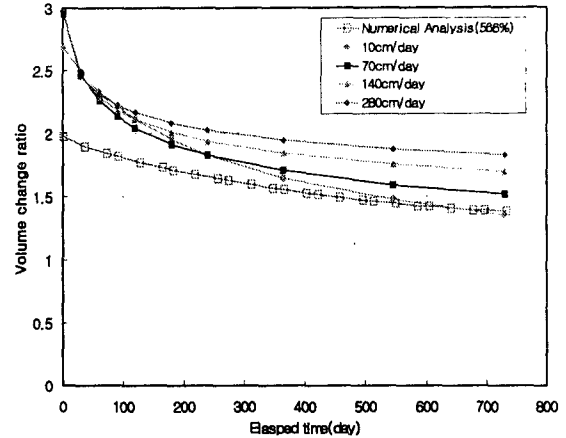
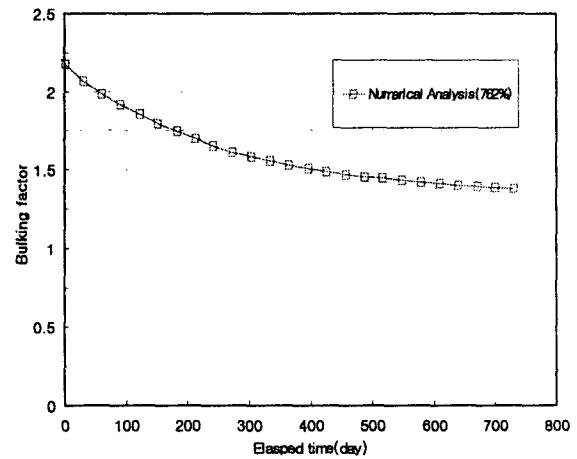
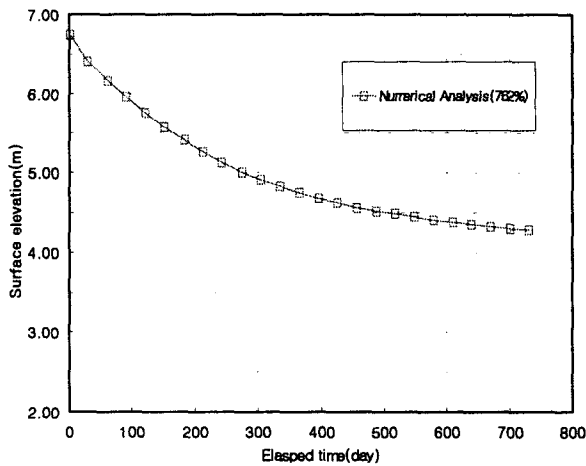


그림 4.2 시간경과에 따른 체적변화비 (566%)

또한 준설점토가 함수비 762%로서 투기일수 77일 동안 6.74m가 투기되는 것을 고려하여 해석을 실시하였다. 기본 물성치에 대한 입력변수로서 비중 2.71, 초기간극비는 투기기간의 1/2의 해당되는 간극비인 6.32, 원지반 간극비 2.37을 이용하였다. 그림 4.3 및 4.4는 이에 대한 결과를 나타내고 있다.

해석결과 1년경과시 계면고는 4.75m로서 1.99m의 침하량을 나타냈고, 체적변화비의 경우 1.53 자중압밀 종료시점을 추정되는 730일 경과 시점의 계면고는 4.28로서 2.46m의 침하량이 예측되었고, 체적변화비는 1.38로 예측되었다.



5 결론

본 연구에서는 준설매립 지반의 비선형 유한변형을 압밀 해석을 위해 저응력 압밀 및 투수시험을 실시하였고, 시험결과를 바탕으로 현장에서 준설매립 수행 시 예상되는 조건에 대해 수치해석을 실시하여 준설매립 지반의 침하거동을 예측하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 준설매립지반과 같은 초연약지반의 비선형 유한변형 압밀을 해석하기 위해 실내에서 저응력압밀 및

투수실험을 실시하여 변형의 정도를 나타내는 유효응력과 간극비의 관계와 변형의 속도를 나타내는 간극비-투수계수의 관계로서, $e = 3.04940' 0.1181$, $k(e) = 8E-07e^{5.4059}$ 의 누승함수의 관계식을 얻을 수 있었고, 실내실험과 검증한 결과 좋은 일치를 확인할 수 있었다.

2. 계획고 6.74m에 대해 함수비 566%로서 실시된 단계투기법에 의한 예측과 수치해석결과를 볼 때 단계투기의 경우 각 투기속도별로 1년경과시 1.66, 1.70, 1.84, 1.95의 값을 나타냈고, 수치해석의 경우 1년 경과시 1.55의 값을 나타내어 수치해석결과가 다소 작게 산정 되었다. 또한 자중압밀 종료시점으로 추정되는 730일 경과시 단계투기법은 투기속도별로, 1.35, 1.51, 1.69, 1.82의 값을 나타냈고, 수치해석의 경우 1.38로서 단계투기의 10cm/day의 결과와 유사하게 나타났다.

3. 계획고 6.74m에 대해 함수비 762%인 조건으로 실시된 수치해석 결과 1년경과시 계면고는 4.75m로서 1.99m의 침하량을 나타냈고, 자중압밀 종료시점을 추정되는 730일 경과 시점의 계면고는 4.28로서 2.46m의 침하량이 예측되었고, 자중에 의해 36.5%의 압밀침하 예측되었다.

4. 준설점토의 구성관계를 파악하기 위한 저응력 압밀시험과 최종압밀단계 종료 후 채취한 시료에 대해 실시한 일정변형률 압밀 시험결과에 대한 유효응력-공극비 관계곡선의 불연속 점이 발생함을 확인할 수 있었고, 향후 장비의 보완 등을 통하여 연속적인 관계곡선의 획득을 통한 비교연구가 수행되어야 하겠다.

참고문헌

1. 이 송, 강 명찬(2000), “ 단계투기법에 의한 준설점토의 체적비 산정”, 한국지반공학회 논문집 제16권 1호, pp 167-178
2. 이송, 강명찬, 김홍석(2001), “ 수평진공배수 공법이 적용된 준설매립지반의 압밀해석에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, 제 17권, 4호, pp209-212
3. Gibson, R.E., England, G.L., AND Hussey, M.J.L.,” The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays, I.Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers”, Geotechnique vol 17, 1967.,pp 261-273
4. Pollock G.W.(1988) “Large strain Consolidation of oil sand tailing sludge”. Msc Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta.
5. Yasufumi Umehara and Kouki Zen(1982), “Consolidation characteristics of dredged marine bottom sediments with high water content”, Soil & Foundations, vol.22, No.2, pp. 45-52