

## 초연약 점토의 구성관계 산정식

### An Equation for the Prediction of Material Function of Super Soft Clay

강 명 찬\*<sup>1</sup> Kang, Myoung-Chan  
이 송\*<sup>2</sup> Lee, Song

#### Abstract

In land reclamation construction using marine clay, a measure of material function, that is, the relation between void ratio-effective stress and permeability, is very important aspect for the prediction of self-weight consolidation behavior. But reclaimed ground has very high water content, so there are many difficulties in the laboratory test for measuring material function. For this reason, some researches are carried out using slurry consolidometer to measure material function. In this study, material function was measured using slurry consolidometer, and to overcome the shortcoming of researches using slurry consolidometer, an equation for the prediction of material function was proposed on the basis of column test's parameter. Material function was determined through low stress consolidation test and permeability test, and it also was calculated with the equation using column test parameter. The continuity of material function could be confirmed through these tests. Material function is easily determined with the equation proposed in this study, and can be used for the prediction of self-weight consolidation behavior.

#### 요 지

해성점토를 이용한 준설매립공사에 있어서 준설매립 지반의 자중압밀현상을 예측하기 위해 준설점토의 간극비-유효응력-투수계수의 관계인 구성관계 산정은 가장 중요한 사항이다. 그러나 준설매립 지반은 고풍수비의 재료특성으로 인해 실험을 통한 구성관계의 산정에 많은 어려움이 발생하게 된다. 이를 위해 저응력 압밀시험기 등을 이용한 실험을 통해 산정하고자 하는 연구들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 저응력 압밀시험기를 이용하여 구성관계를 산정하였고, 저응력 압밀시험기를 이용한 실험시 많은 시간이 소요되는 단점을 극복하고자 준설점토를 이용한 컬럼실험에서 얻어진 변수들을 바탕으로 초연약 준설매립점토의 구성관계를 산정할 수 있는 산정식에 대한 연구를 실시하였다. 저응력 압밀 및 투수실험을 통해 준설점토의 구성관계를 파악할 수 있었고, 또한 침강 및 자중압밀 실험결과를 이용하는 구성관계 산정식을 통해 저응력 단계에 대한 구성관계를 얻을 수 있었으며, 저응력 압밀시험에서 얻어진 결과와의 연속성을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구의 산정식을 이용하여 간편하게 구성관계를 파악할 수 있었다. 본 연구의 구성관계 산정식을 이용하여 준설매립지반의 자중압밀현상을 예측에 이용할 수 있으리라고 판단된다.

**Keywords :** Column test, Material function, Slurry consolidometer, Super soft clay

#### 1. 서 론

준설·매립에 의해 형성된 초연약지반의 경우 초기

함수비가 매우 높고, 지반강도가 거의 발현되지 않는 슬러리 상태로서 외부하중이 작용하지 않아도 자중에 의한 큰 침하가 발생하게 되고 압밀 진행에 따른 압축

\*1 정회원, 한국항만기술단 설계사업본부 (Member, Korea Port Engrg. Corp. Research Institute, claychan@netian.com)

\*2 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 교수 (Member, Univ. of Seoul, Dept. of Civil Engrg.)

성과 투수성이 비선형적 변화를 보이게 되며, 지반의 초기함수비가 높을수록 그 비선형성이 증가되게 된다.

이와 같은 비선형 유한변형율압밀 현상을 예측 위해서는 준설매립 점토지반의 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수의 관계인 구성관계의 산정이 매우 중요하다.

이를 위해 Iami et al.(1984)은 Terzaghi의 압밀이론을 이용하지는 않는 침투압밀 실험을 통하여 초 연 약 지반의 유효응력-간극비-투수계수의 관계식을 산정하는 방법을 제안하였지만 이 방법은 실험 종료 후 침투압에 의한 시료의 리바운드로 인한 오차가 발생하게 되는 단점이 지적되었다. 또한 Carrier et al.(1984)은 슬러리 압밀시험기를 이용하여 유효응력-간극비의 관계와 압밀단계 이후의 투수시험을 통하여 간극비-투수계수를 산정하였고, Umehara와 Zen(1980)은 슬러리 압밀시험기를 통한 시험 시간의 단축을 위해 슬러리 압밀시험기와 일정변형압밀시험기를 결합한 실험장치를 바탕으로 구성관계를 산정하여 Mikasa의 압밀방정식을 이용하였다. 그러나 실험동안 비선형 계수가 일정하다는 가정을 하게 되는 단점이 지적되었다. Pollock et al.(1988)은 저응력 압밀 및 투수실험을 통한 고함수비 슬러지의 압밀해석을 위한 구성관계를 파악하였다.

Yano(1985)는 컬럼실험을 통한 압축성을 나타내는 간극비-유효응력 관계식을 제시하였고, Pane & Shiffman(1997)은 고함수비 점토의 침강실험을 통해 얻어진 침강속도를 바탕으로 투수계수를 산정하는 이론식을 제안하였다.

본 연구에서는 이러한 구성관계를 파악하기 위하여 슬러리 압밀시험기를 이용하여 실험을 통해 구성관계를 산정하였고, 또한 슬러리 압밀시험기를 이용한 실험

시 많은 시간이 소요되는 단점을 극복하고자 Yano(1985), Pane(1997)등의 연구결과를 바탕으로 컬럼실험을 통해 얻을 수 있는 변수를 바탕으로 자중압밀단계의 구성관계를 산정할 수 있는 산정식에 관한 연구를 실시하였다.

## 2. 구성관계식

### 2.1 유효응력-간극비 관계식

준설점토를 이용하여 Column에 의한 침강 및 자중압밀 실험을 실시하면 그림 1과 같은 전형적인 침강 및 자중압밀 곡선을 얻을 수 있다. 그림 1에서와 같이 자중압밀 시·종점을 선택하여 그때의 높이에 해당하는 실질토랑고는 식 (1)에 의해 알 수 있고, 이 둘의 관계를 대수눈금으로 표현하면 그림 2와 같은 선형적인 관계를 얻을 수 있다.

$$H_s = \frac{H}{1 + e_0} \quad (1)$$

여기서,  $H$  : 계면고

$H_s$  : 실질토랑고 (흙 입자만의 높이)

$e_0$  : 평균간극비

식 (2)는 이러한 자중압밀의 시·종점에서의 계면고와 실질토랑고 선형적인 관계를 나타내고 있다.

이러한 관계를 바탕으로 Yano(1985)가 제안한 저응력 단계의 간극비-유효응력의 관계식을 유도하는 과정을 살펴보면 다음과 같다.

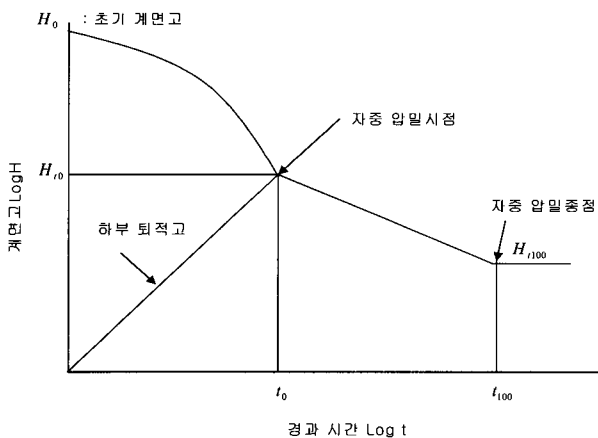


그림 1. 침강퇴적·압밀침강과정의 형태

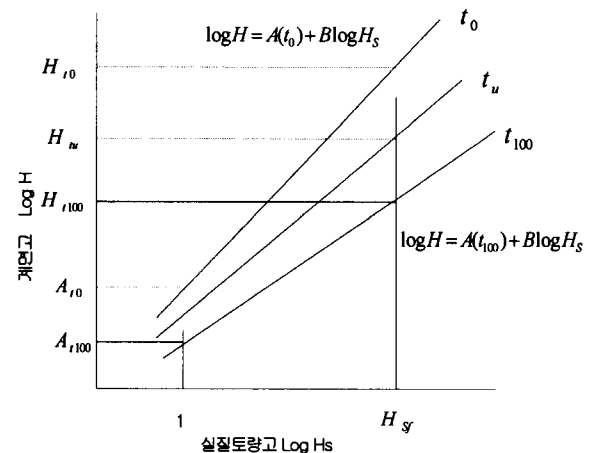


그림 2. 계면고와 실질토랑고의 관계

자중압밀 시 · 종점에서의 높이와 흡입자만의 높이인  
실질토량고의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\log H = \log A + B \log H_s$$

혹은

$$H = H_s^B \cdot A \quad (2)$$

미소 층  $\Delta H$ 와 그때의 실질토량고를  $\Delta H_s$ 로 하면 비  
체적은 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$1 + e = \frac{\Delta H}{\Delta H_s} \quad (3)$$

식 (2)를 미분하고 식 (3)을 대입하면 식 (6)을 얻을  
수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial H_s} = B H_s^{B-1} A \quad (4)$$

$$1 + e = B H_s^{B-1} A \quad (5)$$

$$H_s = \left( \frac{1+e}{AB} \right)^{\frac{1}{B-1}} \quad (6)$$

자중압밀 종료시 준설점토의 임의의 심도에서의 유  
효응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma' &= (\gamma_{sat} - \gamma_w) H \\ &= \left( \frac{G_s - 1}{1 + e} \right) \gamma_w H \\ &= (G_s - 1) \gamma_w H_s \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에 식 (6)을 대입하면 최종적인 간극비와 유효  
응력의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\sigma' = (G_s - 1) \gamma_w \left( \frac{1+e}{A \cdot B} \right)^{\frac{1}{B-1}} \quad (8)$$

혹은

$$e = B \left( \frac{\sigma'}{(G_s - 1) \gamma_w} \right)^{B-1} \cdot A - 1 \quad (9)$$

식 (8) 및 식 (9)는 저응력 단계에 대한 간극비와 유효  
응력의 관계식을 나타내고 있다.

임의의 함수비에 대해 침강 및 자중압밀을 실시하여  
얻어진 침강압밀 곡선을 바탕으로 자중압밀 시 · 종점  
을 추정하고, 그 때의 높이와 실질토량고의 관계를 나타  
내는 직선식을 얻게 되면 이 자료를 바탕으로 간극비  
변화에 따른 유효응력의 변화양상을 나타내는 관계를

얻을 수 있다.

즉 자중압밀 종점에서 계면고와 실질토량고의 관계  
를 나타내는 계수  $A, B$ 를 산정하고 비중을 구하면 식  
(8) 혹은 식 (9)를 통해 간극비와 유효응력의 관계를 얻  
을 수 있다.

## 2.2 간극비-투수계수 관계식

간극비-유효응력의 관계식 산정과 마찬가지로 실험  
을 통한 간극비-투수계수의 구성관계 산정은 많은 노력  
과 시간이 소요되므로 이러한 단점을 보완하기 위하여  
간단한 침강 및 자중압밀실험의 결과로부터 간극비와  
투수계수의 관계식을 다음과 같이 유도하였다.

그림 3은 침강과정에서 부유 흡 입자는 중력작용하에  
서 하향으로, 유체는 상향으로 이동하게 되는 모습을 나  
타내고 있다. 흡 입자와 유체는 비압축성이라는 가정으로  
실시하는 침강실험에서 임의의 수평 x-x단면 이하에서의  
물체의 체적은 항상 일정하다는 연속 방정식이 성립한다.

$$\begin{aligned} (1 - n)v_s + nv_w &= 0 \\ v_s &= n(v_s - v_w) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $v_s$  : 흡입자의 속도

또한 수정 Darcy의 법칙을 적용하면 식 (10)은 식 (11)  
로 표현할 수 있다.

$$n(v_s - v_w) = \frac{k(e)}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x} = v_s \quad (11)$$

식 (11)에서 과잉간극수압의 변화는 유효응력의 원리  
를 통해 식 (12)를 얻을 수 있다.

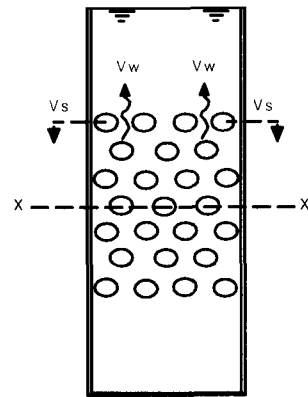


그림 3. 부유입자의 침강

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \frac{\partial \sigma}{\partial x} - \frac{\partial \sigma'}{\partial x} - \frac{\partial u_0}{\partial x} \quad (12)$$

식 (12)에서 전응력과 정수압의 변화는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \left(\frac{G_s + e}{1 + e}\right) \gamma_w, \quad \frac{\partial u_0}{\partial x} = \gamma_w \quad (13)$$

따라서 식 (12)에 식 (13)을 대입하면 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \left(\frac{G_s + e}{1 + e}\right) \gamma_w - \gamma_w - \frac{\partial \sigma'}{\partial x} \quad (14)$$

유효응력의 변화를 얻기 위하여 Chain rule를 적용하면 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial x} = \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial x} \quad (2.15)$$

간극비와 유효응력의 관계를 나타내는 식 (8)을 간극비에 대해 미분하면 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial e} = \frac{(G_s - 1) \gamma_w}{B - 1} \frac{1}{AB} \left(\frac{1 + e}{A \cdot B}\right)^{\frac{2-B}{B-1}} \quad (16)$$

또한 간극비의 변화를 나타내기 위해 식 (5)를 미분하면 식 (17)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial e}{\partial x} = \left(1 - \frac{1}{B}\right) H^{\frac{-1}{B}} \cdot A^{-B} \quad (17)$$

따라서 식 (14)에 식 (15)를 대입하여 정리하면 식 (18)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = \left(\frac{G_s - 1}{1 + e}\right) \gamma_w - \frac{\partial \sigma'}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial x} \quad (18)$$

식 (18)에 식 (16)과 식 (17)을 대입하면 최종적인 과잉간극수압의 변화는 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} &= \left(\frac{G_s - 1}{1 + e}\right) \gamma_w \\ &- \left[ \left(\frac{G_s - 1}{B - 1}\right) \gamma_w \frac{1}{AB} \left(\frac{1 + e}{A \cdot B}\right)^{\frac{2-B}{B-1}} \right] \\ &\times \left[ \left(1 - \frac{1}{B}\right) H^{\frac{-1}{B}} \cdot A^{-B} \right] \end{aligned} \quad (19)$$

식 (11)에서 투수계수는 식 (20)으로 나타낼 수 있다.

$$k(e) = \frac{v_s \gamma_w}{\frac{\partial u}{\partial x}} \quad (20)$$

따라서 식 (19)를 식 (20)에 대입하여 최종적인 간극비와 투수계수의 관계식을 얻을 수 있다.

$$k(e) = \frac{v_s \gamma_w}{\left(\frac{G_s - 1}{1 + e}\right) \gamma_w - K_1 \cdot K_2} \quad (21)$$

여기서,

$$K_1 = \left[ \left(\frac{G_s - 1}{B - 1}\right) \gamma_w \frac{1}{AB} \left(\frac{1 + e}{A \cdot B}\right)^{\frac{2-B}{B-1}} \right]$$

$$K_2 = \left[ \left(1 - \frac{1}{B}\right) H^{\frac{-1}{B}} \cdot A^{-B} \right]$$

상기의 식은 자중압밀 종료시점에서의 계수 A, B와 자중압밀 침하속도  $v_s$ 를 구하면 각 간극비 단계에 대한 투수계수의 관계를 얻을 수 있다.

### 3. 저응력 압밀 및 투수실험

#### 3.1 시료의 물리적 성질

본 연구에 사용된 시료는 광양에서 채취한 해성점토로서 그 물리적 성질은 표 1과 같고 입도분포는 다음 그림 4와 같다.

표 1. 시료의 물리적인 특징

회수	비중	액성한계	소성지수	#200 통과량	통일 분류법
A	2.70	54.4	29.6	96.4	CH
B	2.71	54.9	33.1	98.7	CH

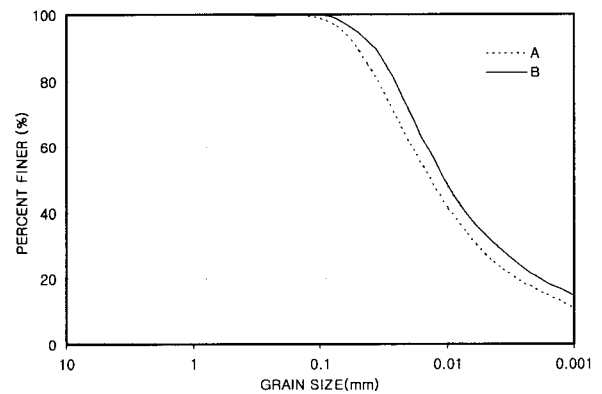


그림 4. 시료의 입도분포 곡선

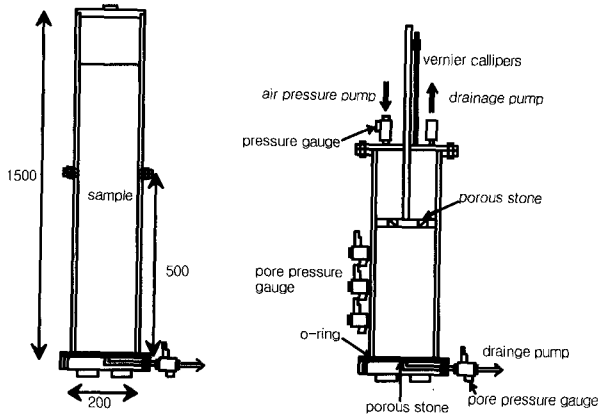


그림 5. 슬러리 베인시험장치

### 3.2 실험장치 및 조건

초연약 점토의 유효응력-간극비-투수계수의 관계를 파악하기 위하여 그림 5와 같은 저응력 압밀시험기를 제작하였다.

시험 절차로는 초기 함수비 500%인 준설토를 제조, 투기하여 자중압밀을 실시하였고 이후 형성된 경계면을 측정하여 자중압밀 침하량을 기록하였다.

자중압밀 종료이후 상부실린더를 제거하여 하중장치를 결합하여 3kPa, 6kPa, 12kPa, 24kPa, 48kPa, 96kPa 응력을 재하하여 양면 배수에 의한 압밀 실험을 실시하였다.

자중압밀 및 각 재하압밀의 침하량을 측정하였고 Asaoka방법을 이용하여 실험종료후의 압밀도를 평가함으로써 시료의 유효응력을 산정하였고 그때의 간극비는 식 (1)을 이용하여 시료전체에 대한 평균간극비를 산정 하였다. 이를 바탕으로 최종적인 유효응력-간극비의 관계를 파악하였다.

자중압밀 및 각 재하압밀 종료 후 압력시스템을 이용하여 상·하부의 수두차를 일정하게 유지함으로써 하부에서 상부로의 흐름을 발생시켜 정수두 투수시험을 실시하였다.

시험시료의 면적, 유량, 경과시간을 통하여 유속을 측정하였고 측정된 유속이 수렴경향을 확인하고 투수시험을 종료하였다. 투수계수는 Darcy의 법칙을 이용하여 산정 하였고 이때 유속은 투수 시험 시 측정된 유속이 수렴되는 값을 바탕으로 식 (22)을 이용하여 투수계수를 산정 하였다. 이를 바탕으로 최종적인 간극비-투수계수의 관계를 파악하였다. 또한 산정식을 통한 구성관계를 파악하기 위하여 초기 함수비 500%에 대해 높이를 120, 100, 80, 60cm로 달리 하여 침강 및 자중압밀시험

표 2. 시험조건

시험 항목	범 위
저응력 압밀시험	초기함수비 500% 압밀응력: 3kPa, 6kPa, 12kPa, 24kPa, 48kPa, 96kPa
투수시험	각 재하압밀 완료 후 실시
자중압밀 시험	초기함수비: , 500% 초기시료높이: 120, 100, 80, 60cm

을 실시하였다. 각 실험조건은 표 2와 같다.

$$k = \frac{v}{i} \quad (22)$$

여기서,  $v$  : 유속  $i$  : 동수경사

### 3.3 실험결과

#### 3.3.1 저응력 압밀시험결과

그림 6은 초기시료 높이와 함수비를 통해 산정된 실질토량고를 이용하여 산정된 시간경과에 따른 평균간극비의 변화를 나타내고 있다. 초기간극비가 13.7인 시료는 자중압밀 종료시 6.8 정도로 감소하였고 최종 압밀 종료 시 1.8 정도로 감소하여 상당한 범위에 걸쳐 압밀을 경험하였다. 이중 자중압밀에 의한 변형이 58% 정도를 나타내는 결과를 보여 주었다.

각 압밀단계 시료의 최종높이와 시료의 실질토량고를 통해 평균간극비를 산정하였고, 각 단계별 침하결과를 바탕으로 Asaoka방법을 이용하여 실험종료시의 압밀도를 평가하였다.

압밀도를 평가한 결과 각 재하압밀 단계는 압밀도 90% 이상의 결과를 나타냈고 이를 통해 각 재하압밀 종료후의 유효응력을 산정 하였다. 위의 결과를 통해서 산정된 유효응력 및 간극비 관계는 표 3과 같다.

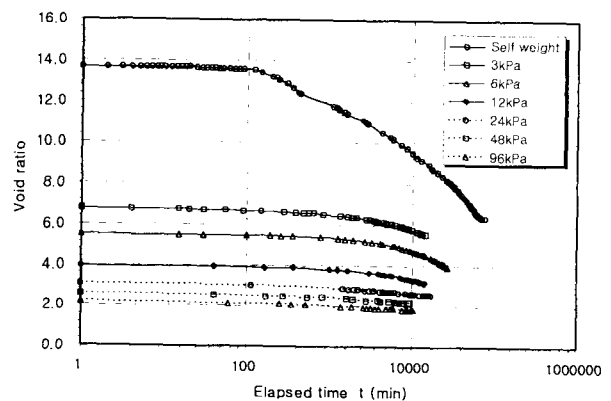


그림 6. 각 압밀단계별 시간- 간극비 관계

표 3. 압밀단계별 유효응력 및 간극비

하중단계	재하압밀 응력 (kPa)	압밀도 (%)	유효응력 (t/m <sup>2</sup> )	간극비
자중압밀	0.68	91.5	0.062	6.78
1단계	3	95.0	0.095	5.53
2단계	6	94.8	0.2844	3.94
3단계	12	93.8	0.5628	3.02
4단계	24	96.1	1.1532	2.53
5단계	48	94.8	0.2844	2.17
6단계	96	93.8	0.5628	1.82

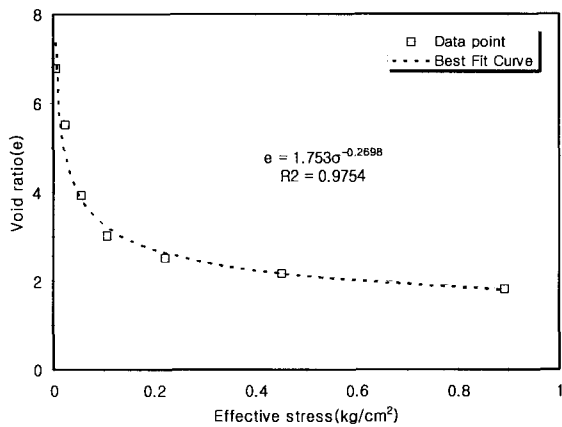


그림 7. 유효응력- 간극비 관계

그림 7은 저응력압밀 실험결과를 바탕으로 산정된 간극비- 유효응력의 관계 및 이를 회귀 분석한 결과를 나타내고 있다. 회귀분석한 결과 Smogi 등이 제시한  $e = 1.753\sigma^{-0.2698}$  누승함수 형태로서 정도 높게 표현할 수 있었다.

### 3.3.2 투수시험결과

투수시험의 경우 각 단계의 압밀종료 시 수두차를 상하부에 형성시켜 투수시험을 실시하였다. 그림 8은 각 재하압밀종료 시 실시된 투수시험에서 얻어진 시간경과에 따라 유속의 변화를 나타내고 있다.

측정된 유속은 시간이 경과함에 따라 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타냈고 측정된 유속이 수렴하는 정적상태(steady flow)인 경우의 값을 바탕으로 Darcy의 법칙을 이용하여 투수계수를 산정 하였다. 이 결과는 표 4와 같다.

그림 9는 저응력압밀 실험완료 이후 실시된 투수실험 결과를 바탕으로 산정된 간극비-투수계수의 관계 및 이를 회귀 분석한 결과를 나타내고 있다. 회귀분석한 결과 유효응력-간극비의 관계에서와 같이  $k(e) = 2E - 10e^{5.5693}$  인 누승함수 형태로 정도가 높게 잘 표현할 수 있었다.

표 4. 투수시험단계별 간극비-투수계수

시험단계	동수 경사	유속 (cm/min)	투수계수 (cm/sec)	간극비
자중압밀	3.33	4.09E-03	2.04E-05	6.78
1단계	3.55	5.32E-04	2.50E-06	5.53
2단계	6.99	9.41E-05	2.25E-07	3.94
3단계	5.62	3.06E-05	9.07E-08	3.02
4단계	6.62	1.26E-05	3.18E-08	2.53
5단계	8.15	9.04E-06	1.85E-08	2.17
6단계	8.28	5.55E-06	1.12E-08	1.82

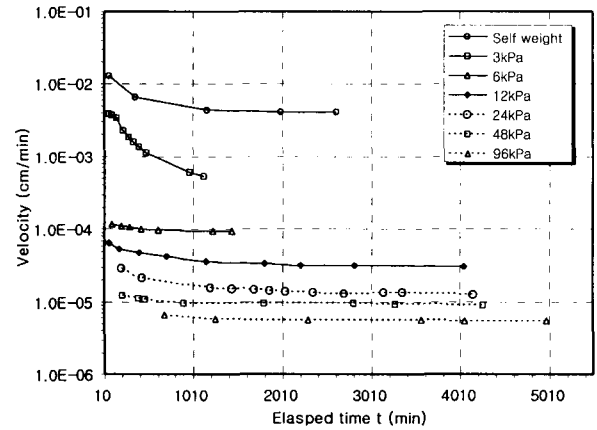


그림 8. 시간-유속변화 관계

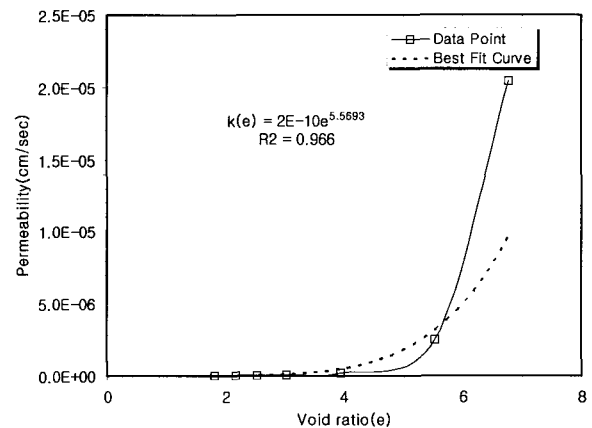


그림 9. 간극비 -투수계수 관계

## 4. 구성관계 산정식의 적용

준선택점토의 저응력 단계에 대한 구성관계 획득을 위한 실험 시 많은 노력과 시간이 요구되는 단점을 극복하고자 Column을 이용한 간단한 침강 및 자중압밀 시험의 결과를 이용한 산정식을 통해 구성관계를 산정하였다.

구성관계 산정식의 적용성을 판단하기 위하여 동일한 시료를 함수비 500%로 제조하고, 초기높이를 달리

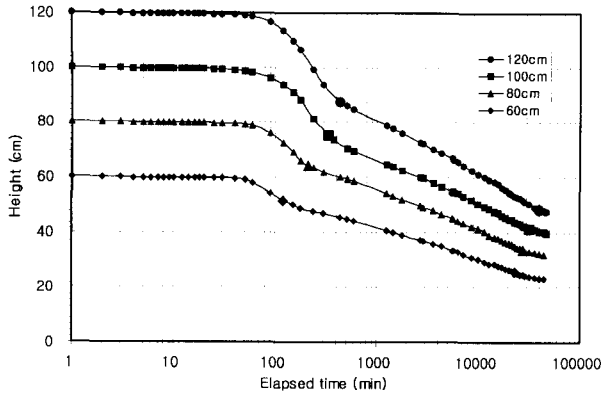


그림 10. 시간-계면고의 변화 (500%)

하여 침강 및 자중압밀시험을 실시하였다. 그림 10은 함수비 500%로 실시된 침강 및 자중압밀 시험결과로서 시간경과에 따른 계면고의 변화 및 자중압밀 시·종점의 추정결과를 나타내고 있다.

그림 10에서 추정된 자중압밀 시·종점의 높이와 질토량고의 관계식으로부터 절편  $A$ 와 기울기  $B$ 를 산정하였고, 시간경과에 따른 계면고의 변화를 통해 침하속도를 산정하였고 이를 구성관계산정에 이용하였다.

#### 4.1 유효응력-간극비 관계

앞에서 유도된 산정식을 바탕으로 동일한 시료를 이용하여 함수비 500%로 실시된 침강 및 자중압밀 실험 결과로부터 저응력 단계에 대한 유효응력-간극비의 관계를 산정 하였다.

산정 시 이용된 변수는 초기높이 100cm, 계면고와 질토량고의 관계식의 기울기( $B$ ) 및 절편( $A$ )은 각각 0.8797, 8.75를 이용하였다.

그림 11은 침강 및 자중압밀 실험결과를 통해 얻어진

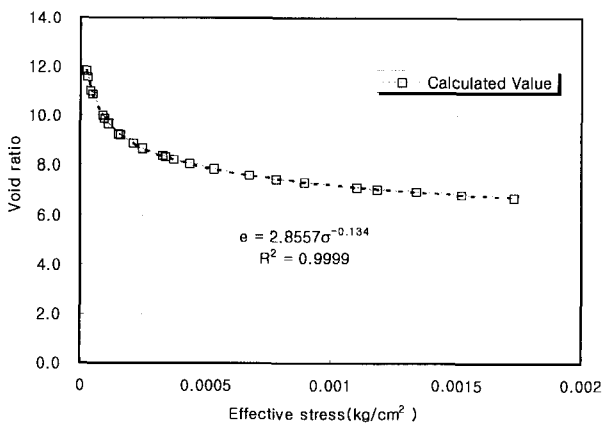


그림 11. 자중압밀 단계에 대한 간극비-유효응력 관계

변수를 통해 자중압밀 단계에 대해 산정된 유효응력-간극비의 관계곡선을 나타내고 있고, 회귀분석한 결과  $e = 2.8557\sigma^{-0.134}$ 와 같은 누승함수형태로서 정도가 높은 관계곡선을 얻을 수 있었다.

이렇게 산정된 결과의 적용성을 검토하기 위하여 앞 절에서 저응력 압밀 실험을 통해 산정된 유효응력-간극비의 관계와 자중압밀 단계에 대해 산정식을 통해 얻어진 결과를 비교하였다.

그림 12는 자중압밀 단계에 대해 산정식을 통해 산정된 값과 그 이하의 간극비에 대해 실내실험을 통해 산정된 결과를 나타내고 있다.

자중압밀단계에 대해 산정된 결과와 그 이하 실험을 통해 얻어진 결과사이에서 연속성을 확인할 수 있었다. 즉 동일한 시료의 경우 침강 및 자중압밀 단계와 그 이하의 단계에 대한 유효응력-간극비의 관계는 연속성이 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4.2 간극비-투수계수 관계

앞에서 유도된 산정식을 바탕으로 동일한 시료를 이용하여 함수비 500%로 실시된 침강 및 자중압밀 실험 결과로부터 저응력 단계에 대한 간극비-투수계수의 관계를 산정 하였다.

산정 시 이용된 변수는 간극비-유효응력의 산정시와 동일한 값을 이용하였고, 시간경과에 따른 계면고의 변화로부터 침하속도를 산정하여 이용하였다.

그림 13은 자중압밀 단계에 대해 산정된 간극비-투수계수의 관계곡선을 나타내고 있다. 즉 침강 및 자중압밀 실험결과를 통해 얻어진 변수를 통해 자중압밀 단계에 대한 간극비-투수계수의 관계곡선을 나타내고 있으며,

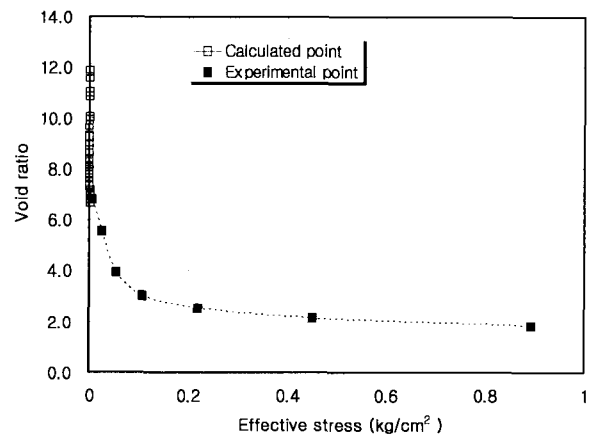


그림 12. 유효응력-간극비 관계

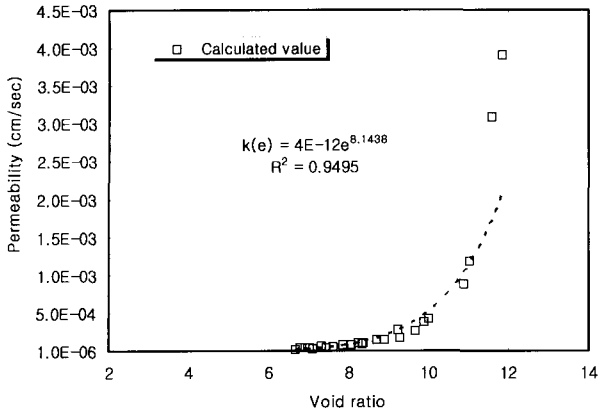


그림 13. 자중압밀 단계에 대한 간극비-투수계수 관계

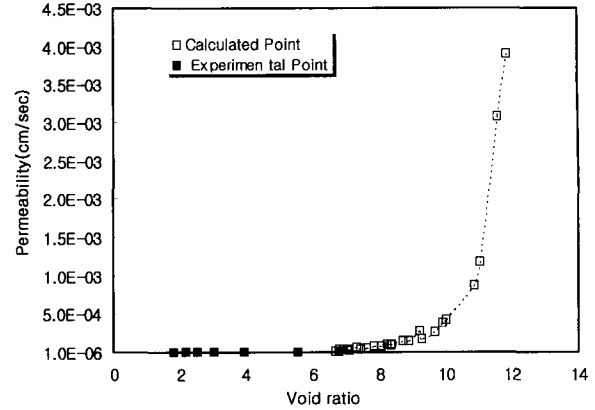


그림 14. 간극비-투수계수 관계

$k(e) = 4E - 12e^{8.1438}$ 의 누승함수형태의 정도가 높은 관계곡선을 얻을 수 있었다.

이렇게 산정된 결과의 적용성을 검토하기 위하여 저응력 압밀 실험을 통해 산정된 간극비-투수계수의 관계와 자중압밀 단계에 대해 산정식을 통해 얻어진 결과를 비교하였다.

그림 14는 자중압밀 단계에 대해 산정식을 통해 산정된 값과 그 이하의 간극비에 대해 실내실험을 통해 산정된 결과를 나타내고 있다.

유효응력-간극비의 관계에서와 마찬가지로 자중압밀단계에 대해 산정된 결과와 그 이하 실험을 통해 얻어진 결과 사이에서 연속성을 확인할 수 있었다. 즉 동일한 시료의 경우 침강 및 자중압밀 단계와 그 이하의 단계에 대한 간극비-투수계수의 관계는 연속성이 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

초연약 점토의 구성관계 파악을 위해 침강 및 자중압밀, 저응력압밀실험, 투수실험을 이용한 구성관계의 획득 및 침강 및 자중압밀 실험에 의한 산정식 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 저응력 압밀실험기를 이용한 저응력 압밀시험 및 투수 실험 결과 누승함수 형태의 유효응력-간극비-투수계수 관계인 재료의 구성관계를 얻을 수 있었고, 초연약점토의 구성관계 파악을 위해 이용할 수 있으리라 판단된다.
- (2) 침강 및 자중압밀 실험결과를 이용하는 구성관계산정식은 저응력 단계에 대한 구성관계를 정도 있게 산정할 수 있었고, 저응력압밀 실험결과와 연속성을 확인할 수 있었다.
- (3) 구성관계 산정식을 통해 결정된 구성관계는 회귀분석결과  $e = 2.8557\sigma'^{-0.134}$ 인 간극비-유효응력 관

계와  $k(e) = 4E - 12e^{8.1438}$ 인 간극비-투수계수의 관계를 얻을 수 있었고 이를 바탕으로 준설퇴립 지반과 같은 초연약지반의 자중압밀 거동 해석 시 이용될 수 있으리라 판단된다.

향후 현장계측치와 산정식을 이용하여 결정된 구성관계를 바탕으로 한 해석결과의 비교검토 등을 통한 보완 연구들이 계속되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 이송, 강명찬(2002), "초연약점토의 구성관계 산정에 관한 실험적 연구", *한국지반공학회 학술발표회 논문집*, pp.491-498.
2. Carrier, W. D, Beckman, J. F(1984), "Correlation between Index test and Properties of Remoulded clay", *Geotechnique*, Vol.34, No.2, pp.211-228.
3. Goro Imai, Kouichiro Yano and Shigeru Aoki(1984), "Applicability of Hydraulic Consolidation test for very soft clayey Soils", *Soils & Foundation*, Vol.24, No.2, June, pp.29-42.
4. Pane, V. and Schiffman, R. L.,(1997), "The Permeability of Clay Suspensions", *Geotechnique*, Vol.47, No.2, pp.273-288.
5. Pollock G.W.(1988), "Large strain Consolidation of oil sand tailing sludge", Msc Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, pp.62-89.
6. Srboľjub Masala.(1998), "Numerical simulation of sedimentation and consolidation of fine tailings", Msc Thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta, pp.65-91.
7. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leropueil, S.(1983), "The Permeability of Natural Soft Clays. Part II : Permeability Characteristics", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, No.4, pp.645-660.
8. Yaufumi Umehara and Kouki Zen.(1980), "Cons-tant Rate of Consolidaiton For Very Soft Clayey Soils", *Soils & Foundations*, Vol.20, No.2. pp.79-95.
9. Yano.,(1985), "Properties of very soft ground reclaimed by dredged marine clay and their prediction", *土木學會論文集*, 第 364 號, III-4, pp.8-10.

(접수일자 2002. 11. 29, 심사완료일 2003. 2. 10)