

# 준섷점성토의 압밀특성에 미치는 시간효과

The Aging Effect of Dredging Clayey Soil on the Consolidation Characteristics

김 형 주\*  
Kim, Hyeong-Joo

---

## Abstract

According to the field measurement of dredging-reclaimed land, the actual self-weight consolidation settlement has been frequently reported to be less than the predicted values based on the laboratory test results. The author estimates that one of the reasons is the reduction of the compressibility due to the sedimentation of the dredging material. Furthermore, the aging effect is ignored in the consolidation characteristics of the very low stress range as a pump dredging-reclaimed land.

In this paper, a series of seepage consolidation tests has been carried out by applying the seepage force to the specimen prepared by sedimentation in consolidometer in order to clarify the aging-effect on the compressibility of dredging clayey soil. Also, with a view to overcome unstable consolidation solution occurring in the case where the initial water content is higher as pump-dredging reclaimed land, the finite difference analysis technique using predictor-corrector method is suggested that it gets good agreement with experimental results.

Finally, the compressibility of the dredging clayey soil is depended on self-weight consolidation time.

## 요 지

준섷매립지의 현장계측결과에 의하면 실제의 자중압밀 침하량은 실내시험결과를 근거로한 설계치보다 작게 평가되고 있다. 이러한 원인중의 하나를 본 연구에서는 준섷재료의 퇴적시 압축성의 저감에 의한 것이며 더욱이 이러한 시간효과는 펌프준섷매립지와 같이 저응력범위의 압밀 특성에서는 고려되고 있지 않는 실정이다.

본 논문에서는 준섷점성토의 압축성에 대한 시간효과를 파악하기 위하여 퇴적된 공시체에 침투력을 작용시켜 일련의 침투압밀시험을 수행하였다. 또한 본 연구에서와 같이 초기함수비가 큰

---

\* 정희원, 군산대학교 공과대학 해양공학과 전임강사

경우에 발생하는 압밀해의 불안정성을 극복하기 위하여 예측자-수정자법을 이용한 유한차분해석기법을 제시하였고 실험결과와 비교하여 좋은 결과를 얻었다.

최종적으로 준설풀점토의 압축성은 자중압밀시간에 의존되고 있음이 관찰되었다.

## 1. 서 론

펌프이송에 의해 준설풀점토를 매립지내에 투입하여 조성된 매립지반은 함수비가 매우 높고 투입과 동시에 현탁액의 침강이 시작되고 계속해서 자중압밀이 개시된다. 이 자중압밀이 종료하여 지반이 안정된 상태에 도달할 때까지는 장시간이 요구되고 도중에 침하가 크게 발생하므로 공기관계상 매립 후 비교적 빠른 시기에 자중압밀도중에 있는 지반에 Geotextile를 이용하여 성토하는 경우도 발생한다. 이와 같은 미압밀점토지반의 압밀속도나 침하량을 정확하게 예측하기 위해서는 자중압밀상태, 압밀특성 및 압축성을 정확하게 파악하는 것이 중요하고 그 결과는 시공공정과 설계토량에 크게 영향을 미치고 있다.

대다수의 기술자의 경험과 현장계측결과에 의하면 자중압밀침하량이 실내시험결과를 근거로한 설계치보다 작게 평가되고 있다.<sup>1)</sup> 저자는 그 이유중 하나가 준설풀점토의 경시적 구조 골격 형성시 압축성의 저감을 실내시험시 정확하게 고려하지 않고 현장의 압밀특성을 예측하는데 그 원인이 있다고 생각된다. 즉, 연약한 준설풀점토의 자중압밀해석은 실제 준설풀과 동일한 정도의 함수비로 교반한 시료를 사용하여 실내 시험에 의해 구한 압축성과 투수성이 이용되고 이 시험은 통상 1주간으로부터 10일 정도의 단기간에 이루어진다. 보통 점토지반에서는 흙의 압축성은 유효응력과 일차적 관계인 선형적으로 해석되고 있다. 그러나 실제적으로 이용되고 있는 준설풀매립점토는 유효응력이 매우 작은 영역이고 흙의 구조의 형성에 있어서 점토입자의 전기적, 화학적 결합력의 영향이나 점토구조가 형성된 후의 시간경과에 따른 압축

성이나 강도특성의 변화 즉, 시간효과도 무시할 수 없는 문제이다.

본 연구는 매우 연약한 상태에서 형성된 점토구조의 압축성과 강도특성이 시간경과와 함께 어떻게 변화하는가를 파악하고자 한다. 우선 자중압밀을 고려한 압밀수치해석결과와 시험결과를 비교한 후 시험결과를 중심으로 압축성의 변화를 비교검토 하였다. 시험은 해수를 사용하여 고풀함수비로 성형된 시료를 16일~44일간 자중압밀시킨 후 침투압밀에 의해 자중압밀기간과 최종침하량 관계를 조사하였다. 또한 압밀수치해석으로서 흙의 자중, 체적압축계수, 투수계수 등의 변화를 고려한 Mikasa(三笠)<sup>2)</sup>의 유한변형압밀이론은 초기함수비가 매우 높은 경우 해가 불한정하기 때문에 예측자, 수정자법<sup>3)</sup>에 의한 차분해석 방법을 제시하고자 한다.<sup>3)</sup>

## 2. 이론적 배경

### 2.1 자중압밀이론과 차분계산

점토의 자중과 압밀층 두께 및 압밀계수(Cv)의 변화를 고려한 일반화된 압밀 방정식은 Mikasa(三笠)<sup>2)</sup>의 의해 다음식으로 제안되었다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \zeta^2 \left\{ C_v \frac{\partial^2 \zeta}{\partial Z_0^2} + \frac{dC_v}{d\zeta} \left( \frac{\partial \zeta}{\partial Z_0} \right)^2 - \frac{d}{d\zeta} (C_v M v \gamma') \frac{\partial \zeta}{\partial Z_0} \right\} \quad (1)$$

여기서  $\zeta$ : 압밀비( $\frac{f_0(=1+e_0)}{f(=1+e)} = \frac{dZ_0}{dZ}$ ),  $f_0$ : 원시좌표에 대한 초기 체적비,  $Z_0$ : 원시좌표로

서 초기체적비에 대한 고정좌표,  $C_v$ : 압밀계수,  $M_v$ : 체적압축계수,  $t$ : 시간,  $\gamma'$ : 점토의 수중단위 중량이다.

식(1)은 해석적으로 해를 구할 수가 없으므로 차분식에 의해 제 1근사값 ( $\Delta\zeta_1$ ), 제 2근사값 ( $\zeta_1 + \Delta\zeta_1/2$ )을 구해 반복해서 수렴점을 찾아내어 해를 구하지만 본 연구에서와 같이 초기체적비( $f_0 = 1 + e_0$ )가 10.0을 넘는 고함수비의 준서매립점토에서는 이러한 차분방법은 해가 진동, 발산하고 계산시간도 장시간 소요되어 실용상 해석이 불가능 하므로 해의 안정 및 정도를 가진 수치해법으로 Douglas & Jones<sup>3)</sup>가 제안하고 Remson<sup>4)</sup>이 상세하게 설명하고 있는 비선형 포물선의 미분방정식인 예측자법(Predictor Method), 수정자법(Corrector Method)을 식(1)의 압밀방정식에 적용하고자 한다.

## 2.2 예측자, 수정자법에 의한 압밀 방정식

Douglas & Jones의 예측자-수정자법<sup>3)</sup>은 시간  $t$ 와 공간  $x$ 를 독립변수로 하는 임의 함수  $u(x, t)$ 에 관한 일반해가 다음식과 같이 제안된 미분방정식을 대상으로 하고 있다.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = g_1(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) \frac{\partial u}{\partial t} + g_2(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}) \quad (2)$$

여기서  $g_1, g_2$ 는 괄호안에 표시된 인수를 변수로 하는 임의의 함수이고, 시간  $t = j \cdot \Delta t$ 에서  $x$ 축상의 격자  $i$ 에 관해  $u$ 의 값을 이용하여  $t = (j+1)\Delta t$ 에서 해  $u_{i,j+1}$ 를 구할 수 있으며 1개의 Time step을 2회 나누어 계산하므로 해의 안정성과 정도향상을 도모할 수 있다. 이러한 차분방법은 Grank-Nicolson형의 음해법이며 종래 압밀방정식에 이용되고 있는 양해법에 비해 수치해석상의 제약, 차분간격 선택등이 크게 완화된다. 식(2)와 (1)를 비교하기 위하여  $u \rightarrow \zeta, x \rightarrow z_0$ 로 변환하면 식(1)은 식(2)의 일

반형이 되며  $g_1, g_2$ 는 다음과 같다.

$$g_1 = \frac{M_v \gamma_u}{k \zeta^2} \quad (3)$$

$$g_2 = \frac{1}{C_v} \left\{ \frac{d}{d\zeta} (C_v M_v \gamma)' - \frac{dC_v}{d\zeta} \right\} \frac{\partial \zeta}{2\Delta Z_0} \quad (4)$$

다음은 차분 Matrix해법을 위해 식(2)에서  $u \rightarrow \zeta, x \rightarrow z_0$ 로 변환하여 식(2)를 예측자, 수정자 차분식으로 표시한 후 기지량을 우변, 미지량을 좌변으로 정리하면 식(2)의 예측자-수정자법은 아래와 같이 식(5)와 (6)으로 요약할 수 있다.

예측자법(Predictor method)

$$\zeta_{i+1,j+1/2} + (-2 - g_1^0 \frac{\Delta x}{\Delta x/2}) \zeta_{i,j+1/2} + \zeta_{i-1,j+1/2} = g_1^0 \frac{\Delta x}{\Delta t/2} \zeta_{i,j} + g_2^0 \quad (5)$$

수정자법(Corrector method)

$$\zeta_{i+1,j+1/2} + (-2 - g_1^0 \frac{2\Delta x^2}{\Delta t}) \zeta_{i,j+1} + \zeta_{i-1,j+1} = -\zeta_{i+1,j} - \zeta_{i-1,j} + (2 - 2g_1^0 \frac{2\Delta x^2}{\Delta t}) \zeta_{i,j} + 2g_2^0 \Delta x^2 \quad (6)$$

여기서  $\Delta x, \Delta t$ 는 각각  $x, t$ 축 방향의 차분간격, 첨자( $i, j$ ) 등은 차분격자점이다. 식(5) 및 (6)을 Matrix형태로 정리한 후 Gauss소거법에 의해 경계조건을 부여하면 해를 구할 수 있다. 그러나 계수행렬의 형태를 제외한 Gauss소거법은 컴퓨터의 용량과 시간의 소요가 요구되므로 Martrix 계산이 빠른 Thomas 연산법<sup>5)</sup>을 이용하였다.

## 2.3 경계조건과 정상상태

본 연구에서는 점토층 저면이 배수면에 접하

고 있는 경우의 경계조건을 구하기 위하여 그림 1과 같이 점토층 하단면을 기준면으로 하면 전수두, 위치수두, 압력수두는 각각 표 1과 같으며 힘의 평형조건에 의해 점토층 상단면의 전응력과 유효응력은 각각 다음과 같다.

$$\sigma_r = (H_i - H_0)\gamma_w \quad (7-1)$$

$$\sigma'_r = 0 \quad (7-2)$$

또한, 점토층 하단면의 전응력과 유효응력은 다음과 같다.

$$\sigma_B = H_i\gamma_w + H_0\gamma' \quad (8-1)$$

$$\sigma'_B = H_0\gamma' + (H_i - H_n)\gamma_w \quad (8-2)$$

압밀종료후의 정상상태에서는 압밀변형은 더이상 진행되지 않으므로 침투속도는 일정한 값,  $v=v_0$ 에 수렴하며 정상상태에 대한 Mikasa(三笠) 압밀방정식은 다음과 같다.

$$v_0 = Cv\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - Mv\gamma'\right) \quad (9)$$

식(9)에서  $v_0$ 는 정상상태에서의 침투속도,  $Cv$ 는 압밀계수,  $Mv$ 는 체적압축계수이고 미지수인 침투속도  $v_0$ 는 경계조건에 의해 결정되지만 부여된 경계조건에 의해 각층의 값을 직접 구할 수 없으므로 실좌표를 원시좌표로 변환하여  $(\partial \varepsilon / \partial z) = (\partial \zeta / \partial z_0)$ 로 정리하면 식(9)는 다음과 같이 차분식으로 제시된다.<sup>6)</sup>

$$\frac{\zeta_{i+1} - \zeta_i}{\Delta Z_0} = (Mv\gamma')_{i+1/2} + \frac{v_{0i+1/2}}{Cv_{i+1/2}} \quad (10)$$

식(10)에서는 경계값으로  $Z_0 = 0$ 일때  $\zeta = \zeta_0$ 이며  $Z_0 = H_0$  일때  $\zeta = \zeta_{n+1}$  부여되므로  $Z_0 - \zeta$  분포를 가정한 후 임의값  $v_0$ 을 선택하여 식(10)을 이용하여 상단경계값으로부터  $\zeta_1$ 을 순서대로 계산하면 하단에서 경계값과 일치하지

않는 경우에 많은 반복계산이 요구되는 불합리한 점이 생긴다. 그러므로 만족하는 상하단의 경계값  $v_0$ 을 구하기 위해서 우선 식(10)를 각 요소에 대해 열거하여 합한 후  $v_0$ 에 대해 정리하면 식(11)과 같다.

$$v_0 = \left\{ \frac{\zeta_{n+1} - \zeta_1}{\Delta Z_0} \sum_{i=1}^n (Mv\gamma')_{i+1/2} \right\} / \sum_{i=1}^n Cv_{i+1/2} \quad (11)$$

식(11)를 이용하여  $v_0$ 값에 대해 제 2근사값  $\zeta$ 을 구하면 다음식과 같다.

$$\zeta_{i+1} = \left\{ \Delta Z_0 (Mv\gamma')_{i+1/2} + \frac{v_0}{Cv_{i+1/2}} \right\} + \zeta_i \quad (12)$$

식(11)는 다음과 같이 상승평균을 이용하였다.

$$(Mv\gamma')_{i+1/2} = \sqrt{(Mv\gamma')_i \cdot (Mv\gamma')_{i+1}}$$

$$(Cv)_{i+1/2} = \sqrt{Cv_i \cdot Cv_{i+1}}$$

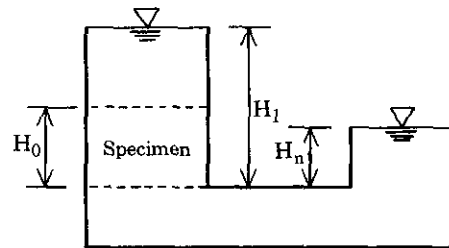


그림 1. 침투압밀 용기내의 수두분포

표 1 경계면의 수두

position	Total head	Elevation head	Pressure head
upper plane	$H_i$	$H_0$	$H_i - H_0$
upper plane	$H_n$	0	$H_n$

이상작업을  $v_0$ 가 수렴할 때까지 반복하여 구하므로써 소정의 정도를 가진 차분계산이 가능하다.

### 3. 시료 및 시험방법

#### 3.1 시료

실험에는 일본 야나이시 준설매립현장에서 채취한 층적점성토를 실트 이상의 입자를 제거하여 조정시료로 사용하였다. 조정의 목적은 침강과정에서 분리퇴적의 영향을 적게하고 가능한 균질하게 모형지반을 형성시키기 위해서이다. 우선 원시료를 함수비 1000% 정도의 slurry 상태로 충분히 교반하여 직경이 420  $\mu\text{m}$ 인 체를 통과시킨 후, 높이 1m, 직경 40cm 대형원형용기에 해수를 50cm정도 채운 후 420 $\mu\text{m}$ 체를 통과시킨 교반시료를 투입하여 침강퇴적이 종료할 때까지 방치한다. 그 후 상등액을 제거하고 퇴적된 시료의 상반분을 채취한다. 이 조작을 2회 반복한 것을 최종시료로 하였다. 조정시료의 물리적 성질을 표 2에, 입도분포곡선을 그림 2에 나타냈다.

#### 3.2 시험장치

시험장치의 상세도를 그림 3에 나타냈고 그림 3(a)는 침강 및 자중압밀 과정을 그림 3(b)는 자중압밀에 이어 침투압밀 과정을 파악하기 위한 것이다. 원형용기는 각 과정의 침하량을 측정하기 위한 투명한 아크릴로서 용기하부는 porous stone을 설치하여 하면 배수를 허용하는 구조로 하였다. 침강 및 자중압밀 과정에서는 용기높이가 어느 정도 필요하므로 용기원통을 2단 연결하여 사용하였고 침투압밀 과정에서는 하단 용기원통에 뚜껑을 설치하여 정수위 수조에 의해 소정의 수두차를 가할 수 있게 하였다.

### 3.3 시험방법

#### (1) 준비

우선 시료의 함수비를 500~600%(염분보정 함수비) 조절하여 균질하게 교반시켰다. 각각 4개의 Cell을 2단으로 연결하여 초기시료 높이가 250mm 되도록 시료를 서서히 투입하고 초기함수비를 측정하였다.

#### (2) 자중압밀 과정

각용기에 투입된 시료를 그대로 방치하고 뚜껑을 씌워 자중압밀 시키면서 시료의 초기높이로부터 시간~침하량을 측정한다. 이때 용기저부의 밸브는 잠그고 비배수 상태에서 측정된 침하량~시간곡선의 형태에 의해 자중압밀 종료시기를 Casagrande법에 의해 결정한다.

#### (3) 침투압밀 과정

자중압밀이 종료하였다고 판단되면 침투압을 작용시키기 위해 상등액을 제거한 후 상부 용기를 제거한 후 뚜껑을 씌워 수조에 튜브를

표 2 시험에 이용된 점토의 물리적 성질

L.L.(%)	P.L.(%)	P.I.(%)	Gs
129	47	82	2.78

\* L.L: Liquid limit  
P.L: Plastic limit  
P.I: Plastic index  
Gs: Specific gravity

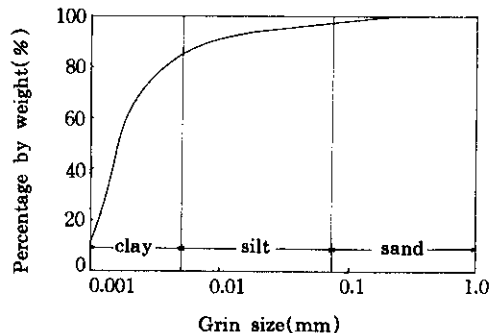


그림 2. 입도분포곡선

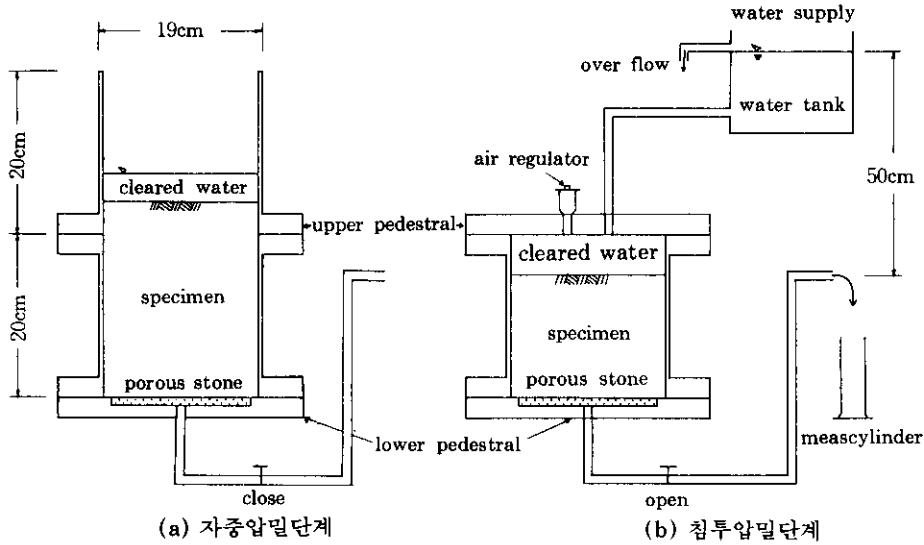


그림 3. 실험 장치

연결한다. 이때 기포가 튜브내에 들어가지 않도록 주의한다. 그리고 시료상부에는 여과지를 설치하여 튜브로부터 물의 흐름이 시료에 직접 닿는 것을 방지한다. 이와같이 설치한 4개의 용기에 순차적으로 50cm 수두차를 작용시키므로 침투압밀을 개시한다. 또한 침투압밀기간 중 시료의 시간~침하량과 배수량을 측정하였다.

#### (4) 함수비 분포 측정

침투압밀이 종료되어 공시체의 배수량이 정상상태에 도달한 시점에서 시험을 중단하고 공시체의 함수비 분포를 측정한다. 측정방법은 우선 상등액을 제거한 후 교란되지 않도록 시료상부로부터 순차적으로 시료를 채취하여 함수비를 측정한다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 압밀정수의 결정

압밀해석시 요구되는 압밀특성으로서  $f - \ln p$  (체적비 - 압밀응력)과  $f - \ln k$  (체적비 - 투수

계수)의 관계가 필요하다. 그러나 준설점성토와 같이 저응력 범위의 압밀특성은 표준압밀 시험법으로는 구할 수가 없으므로 본 연구에서는 자중과 침투수압을 이용한 침투압밀시험에 의해 체적비와 압밀응력, 투수계수관계를 구하였다. 준설점성토는 압밀에 의해 총두께가 크게 감소하여 때로는 50%정도까지 감소하는 경우도 있다. 그러므로 이와같이 변형이 큰 압밀 문제에서는 압밀방정식이 성립하는 각요소의 크기  $\Delta z$ 가 압밀에 의해 감소하는 것을 고려한 Lagrangian 좌표계를 이용하기 위해 좌표변환의 변수로서 원시상태의 좌표(압밀개시전)  $z_0$ 를 다음식과 같이 구했다.

$$\Delta z_0 = \Delta z \left( \frac{f_0}{f} \right) \quad (13)$$

여기서  $\Delta z$ 는 압밀진행과 함께 변하는 실좌표이고 공시체 하부로부터 측정한 높이이다. 또한 실험에 의한 압밀정수 결정은 먼저 자중압밀종료(예비실험에 의해 결정) 후의 함수비를 측정하여 체적비 분포를 구한 다음 원시좌표로 변환시켜 각심도의 함수비에 대응하는 압

표 3 유한차분계산에 이용된 토질정수와 조건

Initial height (cm)	H <sub>0</sub>	25.3	f~lnk relations	H.C.	9.5, 1.33×10 <sup>-2</sup> 5.5, 1.21×10 <sup>-4</sup>		
Initial Volume ratio	f <sub>0</sub>	16.6	f~lnp relations	S.W.C.	9.5, 0.1×10 <sup>-5</sup> 8.5, 2.7×10 <sup>-3</sup>		
Number of mesh	N	40		H.C.	Case 1	5.3, 5.11×10 <sup>-2</sup>	
Initial unit weight of soils(kgf/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>0</sub>	1.07 ×10 <sup>-4</sup>			Case 2	5.8, 5.11×10 <sup>-2</sup>	
Specific gravity	G <sub>s</sub>	2.78			Case 3	6.1, 5.11×10 <sup>-2</sup>	
Drainage Condition	S.W.C:single H.C:double				Case 4	6.6, 5.11×10 <sup>-2</sup>	

\* S.W.C=self-weight consolidation H.C.=hydraulic consolidation

밀응력을 구해서 f-log P관계로 표시한다(자중압밀종료시 과잉간극수압은 제로로 가정). 침투압밀의 경우에도 설명한 것과 같이 압밀종료시의 함수비 측정에 의해 체적비 분포를 구한 후 배수경계면에 대해 간극비-유효응력관계를 구한다. f-log k 관계는 압밀정상상태에서 압밀이 종료한 공시체의 각층에서 측정된 함수비 분포에 의해 구할 수 있으므로 식(13)을 이용하여 원시좌표계의 Z<sub>0</sub>-ζ 곡선의 기울기로서 dζ/dZ<sub>0</sub>을 구해 다음식에 대입하면 C<sub>v</sub>가 구해지므로 투수계수 k를 구할 수가 있다.

$$C_v = \frac{v_0}{\left(\frac{d\zeta}{dz_0} - Mv\gamma'\right)} \quad (14-1)$$

$$k = C_v Mv \gamma_N \quad (14-2)$$

상술한 방법에 의해 구한 토질정수를 표 3에 요약하였다.

#### 4.2 자중 및 침투압밀 과정

본 실험에서는 함수비 560% 정도의 시료를 cell 안에 투입하여 침강, 자중압밀과정을 파악한 결과 시료투입 후 10분 정도 경과 후 시료의 경계면이 나타나기 시작하고 상등액은 점점 투명해진다. 그러나 최초 투입후 10분 정도는 경계면의 변화가 나타나지 않고(토립자간의 상호간섭 현상에 의한) 그후 침하속도는 크게 증가하므로 침강형식으로 볼 때 자중압밀상태이므로 Mikasa의 비선형 탄성압밀이론이 적용될 수 있는 영역이다. 또한 시험시 자중압밀이 진행되면서 시료에 crack이 생기지만 계속해서 자중압밀이 진행되면 crack이 점점 폐합되며, 자중압밀초기에 시료저면에서는 점토입자의 침강에 따른 간극수의 상향흐름에 의해 channelling이 발생하며 점점 소멸된다. 이것은 점토입자의 침강에 따른 간극수의 상향흐름에 의한

것으로 생각할 수 있다. 표 4에 각각의 cell 시료에 대한 자중압밀 및 침투압밀시간을 요약하여 나타냈다. 침투압밀과정에서는 준설 점성토에 일정재하수압(수압차,  $0.05\text{kg/cm}^2$ )을 적용시켜 통수하면 준설 점성토는 침투력에 의해 압밀되며, 침투압밀은 1~2일 정도에서 종료하고 있음을 알 수 있다. 각각의 시료에 대한 자중압밀 과정시 침하곡선이 일치하고 시료간의 데이터 분산이 거의 없는 것은 처음부터 실트분리를 제거함으로써 시료의 균질화가 목적으로 잘 되었음을 알 수 있다. (그림 4)

표 4 자중 및 침투압밀 시간

Case No.	S.W.C. duration time(day)	H.C. duration time(min)
1	16	2100
2	20	1800
3	28	1100
4	44	600

### 4.3 시간-침하량에 관한 고찰

그림 4의 시간-침하곡선의 자중압밀 형태는 한개의 곡선에 집중되고 있는 것을 보면 동일한 점토구조를 가짐으로서 거시적으로 동일한 성질을 유지하고 있다고 볼 수 있다. 그림 4의 case 1-4의 침투압밀 단계에서는 자중압밀 시간이 길수록 점토입자구조 형성시 강도가 증가하므로 침하량은 aging효과에 의해 작게 나타나고 있다.

본 실험에서 얻어진 표 3의 입력정수를 이용하여 자중압밀을 고려한 압밀수치 해석결과와 실험결과를 비교한 것이 그림 5이다. 그림 5(a), (b), (c)의 case 1, 2, 3의 경우 시간-침하곡선의 초기부분 형태를 관찰하면 침하속도의 실측치가 계산치보다 빠르게 나타난 것은 자중압밀 종료단계에서 공시체에 발생한 creep 영향이 침투압밀 과정시 잔류되어 그 이후에 영향을 미치고 있기 때문이다. case 4의 경우는

방치기간이 길기 때문에 어느 정도 공시체에 압축성이 증가되어 정규압밀점토의 압밀거동시 발생하는 creep 침하는 나타나지 않지만 압밀종료시 공시체에 형상변화가 발생하여 실험을 종료하였기 때문에 계산결과가 다소 크게 발생하였다. 침투압밀 종료시점에서 공시체 상부에 형상변화가 다소 발생하는 것은 자중압밀시 수축된 표면에 상부면으로부터 침투수가 가해지는 경우 침투수는 연직방향 외에 간극내부의 수평방향으로도 흐르려는 성질 때문이다. Douglas-Jones의 예측자, 수정자법을 Mikasa의 압밀방정식에 적용한 차분해석은 초기 체적비가 본실험과 같이 매우 연약한 준설점토의 경우에도 해의 진동, 계산시간 등의 문제를 극복함과 동시에 시간효과의 영향을 정량적으로 검토할 수가 있다.

### 4.4 시간 효과에 관한 검토

그림 6은 각 case에 대한 침투압밀 종료시 공시체의 함수비 분포를 측정하여 압밀비( $\zeta$ )와 원시과표와의 관계를 표시한 것이다. 여기서 자중압밀 방치시간을 짧게하여 침투재하한 공시체보다 자중압밀 방치기간을 길게하여 침투재하한 시료가 고함수비상태에서 압밀이 종료하므로 압밀비는 작게 나타나며 또한 그 변화 정도는 방치기간이 길수록 완만한 변화를 하므로 압축성이 감소됨을 알 수 있다. 즉, 시간효과에 의해 점토구조형성시 강도가 증가한 것을

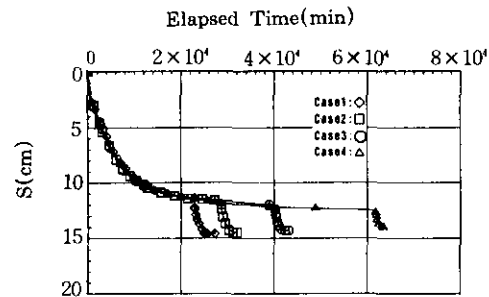
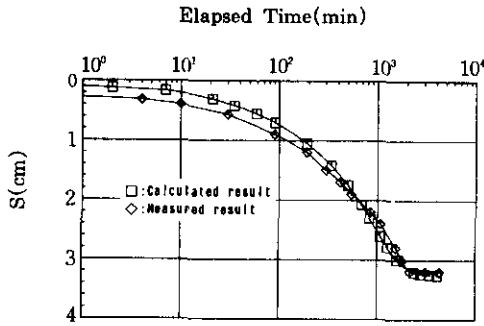
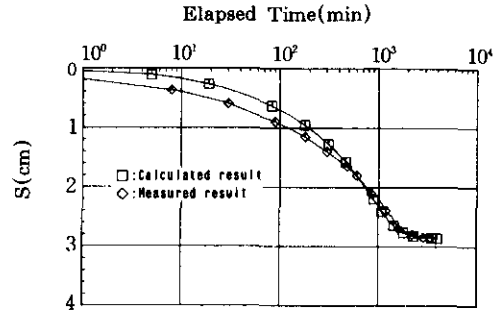


그림 4. 경과시간과 침하량 관계

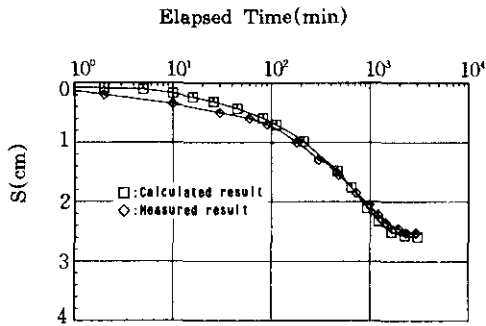




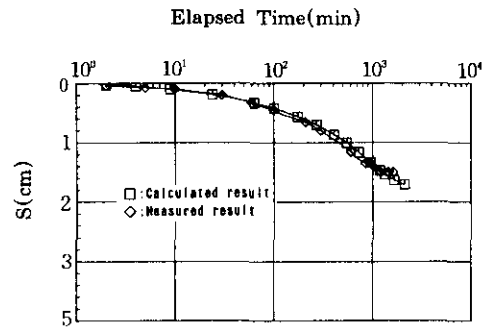
(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3



(d) case 4

그림 5. 각각의 실험결과와 F.D.M. 해석결과와의 비교

의미하고 있다.

점토의 시간효과에 대해서는 일반적으로 2차 압축(2차압밀)이 주된 요인으로 생각되고 있으며, 이것은 점토의 점성적 성질에 의한 것으로서 1차 압밀이 종료하고 유효응력이 일정하게 된 후에도 계속해서 발생한다. 그리고 대수시간~침하곡선은 일차압밀의 특징인 변곡점을 경과한 후 2차 압축에 의한 침하는 직선적으로 증가한다. 그림 7(a)는 이와같은 2차 압축을 갖는 점토의 압축 특성으로서 일반적으로 인정되고 있는 개념을 그림으로 표시하여 A→B는 1차 압밀과정 B→C는 2차 압축을 나타내고 있다.<sup>7)</sup> 2차 압축을 받는 점토에 재하를 하면 어느 정도 과압밀적인 거동을 나타낸 후 (C→D) 원래의 압축곡선(D→E)의 형태에 근접한다. 이에 비해 본 연구의 실험결과는 이 개

념과 두 가지 점이 다르다.

첫째는 그림 5(a)~(d)의 시간-침하곡선에 있어서 침투압밀의 최종단계에서 2차 압축에 의한 침하가 거의 인정되지 않는 것이다. 둘째는 자중압밀 및 침투압밀에 의한 총침하량은 재하시간이 길수록 작은 경향이 있다. 그러나 그림 7(a)의 2차 압축 모델에서 A→E 사이에 발생하는 침하량은 자중압밀 후의 방치시간에 관계없이 거의 일정하거나 또는 재하시간이 길수록 크게 예측된다. 본 연구에 이용된 시료는 현지로부터 채취한 상태의 여러 압밀시험결과 자료를 보면 일반적인 점토의 압밀 특성 및 2차 압축특성을 가지고 있으며 특수한 점토광물 은 아니다. 따라서 전술한 것과 같이 상위점은 함수비가 높은 초연약한 상태에 기인한다고 볼 수 있다. 그림 7(b)는 이 실험으로부터 예상되

는 압축모델을 도식적으로 나타낸 것으로서 그림에서 A→B 경로는 자중압밀과정, B→C는 자중압밀 후 2차압축이며 자중압밀 기간중 2차 압축은 약간 발생하지만 그 크기는 무시할 정도로 작다.

침투압밀 과정은 C→D이고 원래의 압축곡선을 연장한 A→B→E 보다 상부에 위치하며 방치기간이 길수록 동일한 위치에 기울기가 완만하므로 총침하량(AD의 총거리)은 작게 평가된다. 이것은 시간효과에 의해 점토골격구조가 경화된 것이므로 그림 7(a)의 모델에서 나타내는 현상과는 전혀 다르다.

그림 8은 각 case의 자중압밀과 침투압밀의 압축곡선을 그림 6에 의해 표시한 것으로서 자중 및 침투압밀에서 시료상태는 균등하지 않으므로 평균적인 값을 표시하였다. 이 그림은 시간효과가 준설 매립점토와 같은 초연약 점토의 압축성에 크게 영향을 미치고 있음을 확실하게 제시하고 있으며, 그림 7(b)와 같이 시간효과를 고려한 압축곡선을 이용하여야 한다.

이와 같이 준설 매립점토의 압축성에 시간효과가 존재하고 있다는 것은 준설지반의 형성속도, 준설 후의 재하시기 및 재하속도등에 의해 침하량이나 압밀 후의 지반상태에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 실제 현장에서는 장

시간에 걸쳐 시공되므로 압밀시간도 장시간 필요한 상태이고 실내에선 통상 1주간에서 10일 정도, 길어도 1개월 정도에 걸쳐 얻어진 실험 데이터에 의해 압밀해석을 하면 과대한 침하를 예측할 수 있다. 따라서 정확한 예측을 하기 위

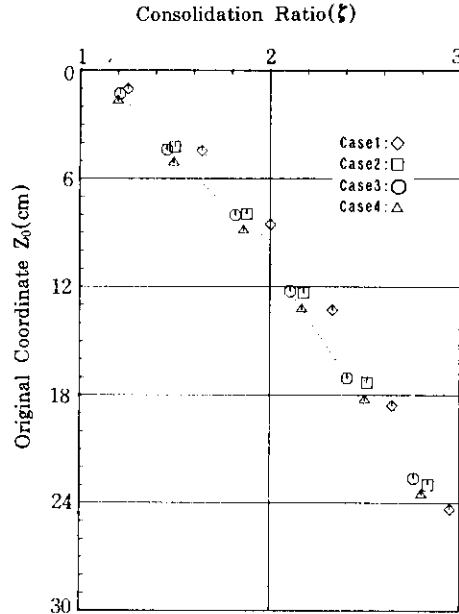
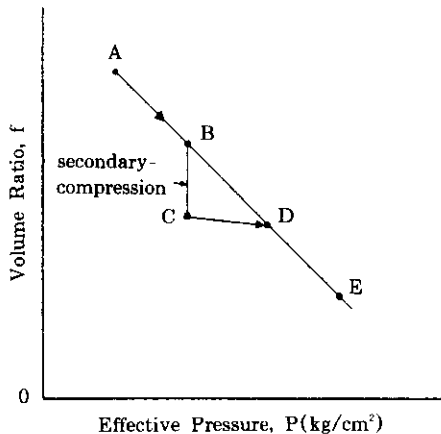
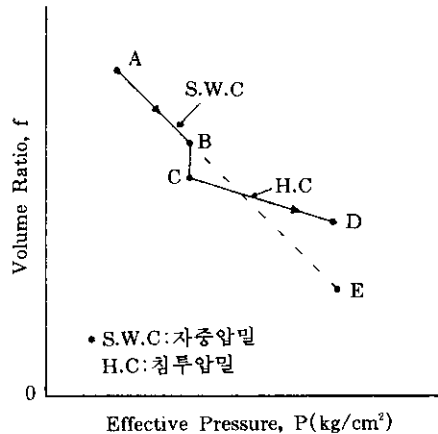


그림 6. 압밀비와 원시좌표관계



(a) 정규압밀 Aged 점토의 체적비와 유효응력관계 (Bjerrum, 1968)



(b) 본연구에서 제시한 체적비와 유효응력관계

그림 7. 체적비와 유효응력의 비교

해서는 압축성에 미치는 시간효과를 설계에 반영할 필요가 있다.

본 연구에서는 시간효과에 관한 정성적인 결과만 얻어졌으므로 앞으로 점토 종류나 입도 조성이 다른 준설 점성토에 대해서 실험을 하여 정량적으로 논의가 필요함과 동시에 준설매립점토의 설계법에 반영이 요구되고 있는 실정이다.

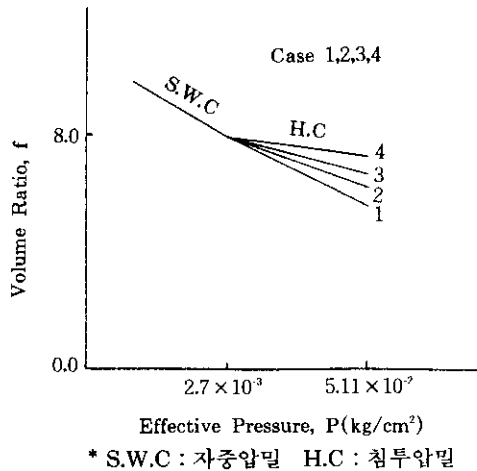


그림 8. case 1, 2, 3, 4에 대한 침투압밀작용시 압축성의 변화

## 5. 결 론

본 연구는 준설매립 점성토의 압축특성에 미치는 시간효과를 침투압밀 재하실험에 의해 파악함과 동시에 예측자-수정자법을 Mikasa의 압밀방정식에 적용하여 차분해석결과 다음과 같이 결론을 요약할 수 있다.

- 1) 고풍수비를 가진 준설 점성토의 압밀해석시 Douglas & Jones의 예측자, 수정자법을 적용한 차분압밀 해석은 해의 안정과 계산시간의 단축을 도모한다.

- 2) 준설 점성토의 시간효과는 점토구조의 경화를 가져오므로 압축성을 감소시킨다.
- 3) 느슨한 상태에서 형성되고 있는 준설점성토는 상재하중이 작용하는 경우 시간효과에 의해 보다 안정된 상태로 점토구조를 형성하려고 한다.
- 4) 실내에서 짧은 시간에 걸쳐 실시한 실험 결과를 이용하면 재하속도가 낮은 현장의 침하를 과대하게 평가할 가능성이 크다.
- 5) 준설점성토의 압축모델은 그림 7(b)와 같으며 일반적으로 점토에서 인정되고 있는 그림 7(a)의 모델은 적용에 문제점이 있다.

## 참 고 문 헌

1. 日本土質工學會中國支部：壓密沈下計算法のアンケート結果について，土質工學研究會報告書，1985，pp. 5~71.
2. 三笠正人：超軟弱粘土の壓密-新壓密理論とその應用-，1963，pp. 56~62.
3. Douglas, J. and Jones, B. : "On predictor-corrector methods for nonlinear parabolic differential equation", J. Soc. Indust. App. Math., Vol. 11, No. 1, 1963, pp. 195~203.
4. Remson, I. : Numerical methods surface hydrology, Wiley interscience, 1971, pp. 71~76.
5. Herbert, F.W. and Mary, P.A. : Introduction to groundwater modeling - Finite difference and finite element methods -, W.H. freeman and company, 1982, pp. 96~99.
6. 金亨柱：埋立粘土の壓密とその力學特性に及ぼす時間效果，廣島大學博士學位論文，1990，pp. 47~77.
7. Bjerum, L. : "Engineering geology of norwegian normally consolidated marine clays as related to settlement of buildings", Geotechnique, Vol. 17, No. 2, 1967, pp. 83~117.

(접수일자 1994. 1. 7)