

# 변형률과 층 두께의 변화를 고려한 준설점토의 압밀특성과 압밀기간

## Consolidation Characteristics & Consolidation Period of Dredged Soil by Considering Change of Strain and Stratum Thickness

정 규 향<sup>1</sup> Cheong, Gyu-Hyang  
김 영 남<sup>2</sup> Kim, Young-Nam  
주 재 우<sup>3</sup> Ju, Jae-Woo

### Abstract

Consolidation characteristics have been investigated by using Rowe cell consolidation tester for dredged soil, which is more than two times as much as the liquid limit. To examine the effects of variation of water content on consolidation characteristic, tests were carried out varying the initial water content from 100% to 150%. The results were compared with the consolidation characteristics of remolded clay. The test results showed that the higher the initial water content of dredged clay was, the more noticeable the non-linear behavior of  $e$ -log  $P$  curves occurred. The variation of the gradient was apparent to load stage 40kPa and became less apparent after load stage 80kPa on the  $e$ -log  $P$  curves. Ratio of compression index stayed within the range suggested by Mesri and variation of initial water content has hardly influenced the coefficient of consolidation. On the contrary, it was found that the magnitude of consolidation load affects the vertical coefficient of consolidation. The variation of stratum thickness during consolidation processing needs to be taken into consideration since hydraulic fill would go through a much larger scale strain than land soil when it is subject to a load. In this study, the consolidation period considering the variation of stratum thickness was analyzed and the results were compared with those of existing consolidation studies which did not consider the variation of stratum thickness. According to the results of the study, the consolidation period of the ground with a larger strain was calculated more close to observed value in case of Mikasa theory which takes the variation of stratum thickness into consideration.

### 요 지

액성한계 두 배 이상의 매우 높은 함수비를 갖는 준설점토의 압밀특성을 파악하기 위해 Rowe cell 압밀시험기를 사용하여 압밀시험을 실시하였다. 초기함수비 변화가 압밀특성에 주는 영향을 검토하기 위해서 함수비를 100~150%로 변화시켜서 실험을 수행하였고 재성형 준설점토의 압밀특성과 비교하였다. 실험결과로부터 준설점토의 초기함수비가 증가할수록  $e$ -log $P$  곡선의 비선형적 거동이 뚜렷하였고, 하중단계 40kPa까지는 곡선의 기울기 변화가 급변하였으며 그 이후의 하중단계에서는 완만한 형상을 보여주었다. 압축지수비는 Mesri(1973)가 제안한 값의 범위 내에 존재하였으며, 초기함수비변화가 압밀계수에 미치는 영향은 거의 없었고 오히려 압밀하중의 크기가 연직압밀계수에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 또한 대형압밀시험기를 이용하여 압밀기간 중 층 두께의 변화를 고려하여 압밀기간을 산정하는 Mikasa이론과 그렇지 않은 Terzaghi의 이론을 비교하였다. 그 결과 변형률이 큰 지반에서의 압밀기간은 압밀기간 중 층 두께의 변화를 고려한 Mikasa 이론의 경우가 그렇지 않은 경우보다 실측치에 근사하게 산정되었다.

**Keywords :** Coefficient of consolidation, Dredged soil, Large settlement, Mikasa theory, Strain

1 정희원, (주)유일종합기술단 과장 (Member, Head of Section, Yooil Engr. Consultants Co., Ltd., cheonggh@hanmail.net)  
2 정희원, (주)동명기술공단 전무이사 (Member, Executive Director, Dongmyeong Engr. Consultants & Architecture)  
3 정희원, 순천대학교 토목환경공학부 교수 (Member, Prof., Faculty of civil and Environmental Eng., Suncheon Univ.)

## 1. 서론

준설패립공사는 항만단지 및 산업부지를 조성하기 위해 가토제를 축조한 후 산토나 준설토를 가토제 내에 계획고까지 투기하는 것을 말한다. 과거에는 패립재로 주위에서 손쉽게 구할 수 있는 산토를 주로 이용하였으나 최근에는 환경문제 등으로 인해 해성점토를 직접 준설토하여 고함수비 상태로 배송관을 통해 가토제 내 준설패립지역으로 투기하고 있다. 가토제 내에 투기된 준설토는 시간 경과에 따라 침강 및 자중압밀 과정을 거쳐 상부는 고결건조층을 형성하지만 하부는 여전히 액성한계 두 배 이상의 고함수비 상태를 유지하고 있다 (Cargill, 1984). 이러한 고함수비 상태의 준설토는 성형이 어렵기 때문에, 기존의 표준압밀시험기로는 압밀시험이 불가능하다(Rowe, 1966). 따라서, 준설토지반 위에 지반개량을 위한 복토시 준설패립토의 압밀변수에 대한 자료가 거의 없어 압밀침하량 및 압밀기간을 예측하는데 많은 문제점을 야기하고 있다. 또한, 고함수비 상태의 준설토는 상재하중 재하시 미소하중에서도 큰 변형이 발생하기 때문에 ‘압밀중 층 두께는 변하지 않는다’ 등 많은 가정조건 하에 유도된 기존의 Terzaghi 압밀방정식에 의한 압밀해석은 많은 문제점을 내포하고 있을 뿐만 아니라 준설패립토지반에 적용이 불가능하다 (三笠正人, 1963). 이와 같은 준설패립토의 합리적인 설계를 위해서는 고함수비 상태로 존재하는 준설패립토의 압밀특성을 보다 엄밀히 분석하고, 대변형(large strain)을 고려한 압밀방정식을 적용할 필요성이 있다(정규향, 2004). 따라서, 본 연구에서는 준설패립토 준설패립토를 실내로 반입한 후 준설패립토지반에서 가장 문제가 되고 있는 압밀변수들의 압밀특성을 분석하기 위해 Rowe cell 시험기를 이용하여 여러 함수비에서 하중증가에 따른 간극비 곡선을 분석하였고, 이를 바탕으로 압밀침하량을 산정하는 압축지수특성, 2차압축지수특성, 변형률 특성 그리고 압밀기간 산정에 관계되는 압밀계수특성 등을 규명하였다. 또 미소변형률의 가정에서 유도된 압밀이론과 대변형의 전제조건 하에 제안된 Mikasa이론에 의해서 준설패립토의 압밀기간을 산정 비교 분석하였고, 이를 검증하기 위해 대형압밀시험을 수행하여 두 이론의 정확성을 검증함으로써 준설패립토의 압밀침하량 및 압밀기간을 효과적으로 산정하는 방법에 대해 제안하는 것을 목표로 하고 있다.

## 2. 층두께의 변화를 고려한 압밀이론

Mikasa(1963)는 압밀중 투수계수, 체적변화계수는 변하며 압밀계수가 일정하다고 가정하는 경우에 대해 변형률개념을 도입하여 다음과 같은 식 (1)을 제안하였다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial a^2} \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 압축변형률,  $c_v$ 는 압밀계수,  $a$ 는 토층의 깊이를 나타낸다.

식 (1)을 유도할 때에  $k$ 와  $m_v$ 가 일정하다는 가정을 사용하지 않았기 때문에, 그것들이 크게 변동한다고 하여도 그 비가 일정하다면  $c_v$ 가 일정한 식 (1)이 성립됨을 알 수 있다. 그리고, Mikasa는 상기 식 (1)에 층 두께가 변하는 특성을 고려하여, 압밀비( $\zeta$ )에 관한 2계편미분 압밀방정식 (2)를 제안하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = c_v \zeta^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z_0^2} \quad (2)$$

여기서,  $\zeta : \frac{(\delta z)_0}{\delta z}$  (압밀비) =  $\frac{1+e_0}{1+e}$

$(\delta z)_0$  : 점토요소의 처음 두께

$\delta z$  : 고려되고 있는 층의 두께

식 (2)에서 압밀량이 적을 경우  $\zeta=1$ 이 되어 Terzaghi의 열전도형 방정식과 똑같은 형태가 되어 엄밀해에 의한 해석이 가능하나 압밀량이 크면 위의 식은 비선형이 되어 초기조건 및 경계조건을 이용하여 유한차분법에 의해 풀면 각 압밀도에 대한 시간계수는 Fig. 1과 같다.

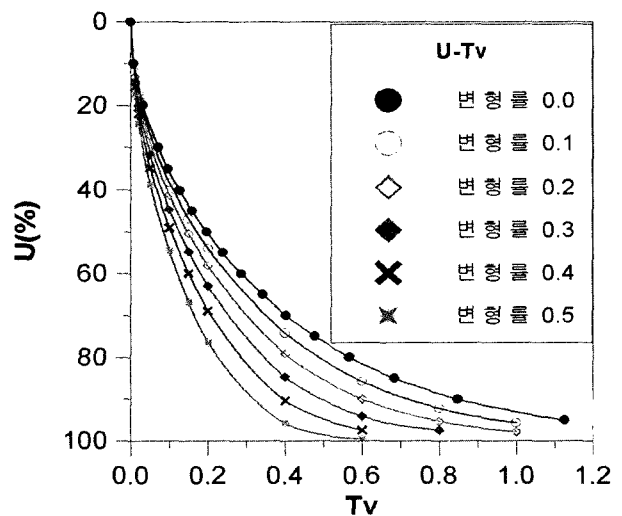


Fig. 1.  $U-Tv$  with strain

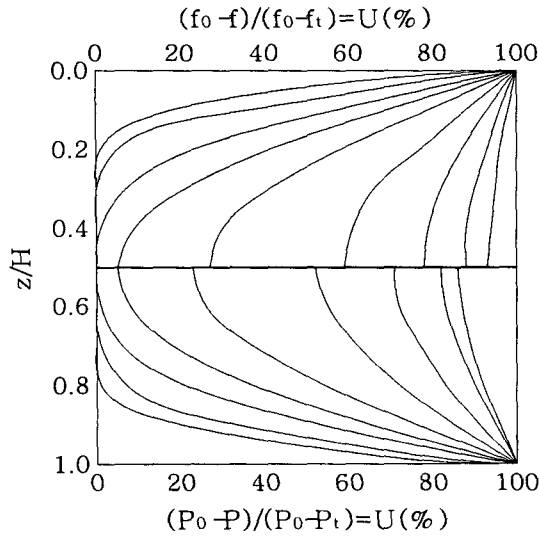


Fig. 2. Degree of consolidation by pore water pressure and strain at  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.1$

Fig. 1은 최종변형률  $\bar{\epsilon}_f$ 의 크기가 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 바뀔 때 평균압밀도에 따른 시간계수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2의 윗 부분은 변형률  $\bar{\epsilon}_1 = \bar{\epsilon}_2 = 0.1$ 에서 체적비의 변화에 의해 계산된 압밀도에 대한 시간계수를 나타낸 것이고, 하반부는 과잉간극수압 소산에 의해 계산된 압밀도에 대한 시간계수의 변화를 나타낸 것인데, 과잉간극수압의 소산방식이 변형률의 진행방식보다 전반적으로 늦어지는 것을 알 수 있다.

Mikasa가 제안한 압밀방정식을 이용하기 위해서는 최종변형률의 결정이 중요하다. 최종변형률  $\bar{\epsilon}_f$ 를 결정하므로써 압밀도에 따른 시간계수를 결정하게 된다. 따라서 Mikasa의 압밀방정식에서는 최종변형률  $\bar{\epsilon}_f$ 가 달라지면 시간계수는 달라진다. 다시 말하면 최종변형률이 증가할수록 시간계수의 값은 감소하게 되고 최종변형률이 0에 가까워지면 Terzaghi의 이론에 근사한 시간계수의 값을 갖는다.

### 3. 실내시험

#### 3.1 사용시료

##### 3.1.1 준설점토

본 연구에 사용된 시료는 전라남도 울촌지역의 표층으로부터 1m 이하에서 채취한 해성점토로서 고함수비 상태에서 불교란시료를 채취하는 것이 매우 어렵다. 따라서 시료를 교란된 상태로 채취하여 체가름시험을 한

Table 1. Physical properties of dredged soil

$w_w$ (%)	95
$G_s$	2.69
$LL$ (%)	50
$PI$	30
$USCS$	$CH$
$P_{200}$ (%)	99.8
Organic content (%)	2.35
$pH$	6.83

결과 #200통과량이 98% 이상이였다. 시료조제는 현장함수비 95% 상태에서 고함수비를 갖는 시료를 제작하기 위하여 현장상태의 시료에 적절하게 증류수를 첨가하여 30분 이상 충분히 교반한 후, 함수비별로 각각 밀폐된 용기에 넣고 48시간 이상 방치하여 시료가 완전히 포화되도록 하였다.

제작된 시료는 함수비가 100%, 110%, 120%, 133%, 150%로서 액성한계의 2배 이상이 되는 초연약준설토이고 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 Table 1에 나타난 바와 같이, 비중 2.69, 액성한계 50%, 소성지수 30, pH 6.83, 유기물 함량 2.35%로서 흙의 종류는 통일분류법상 고압축성 점토인  $CH$ 로 분류되었다.

대형압밀시험에 사용된 시료도 위와 같이 제작하였으며 함수비는 98%와 148%로 2개의 시료를 조제하였다.

##### 3.1.2 재성형점토

재성형준설점토의 시료제작은 직경 151mm의 Rowe cell 압밀시험기를 직접 이용하였다. 실내로 반입된 슬러리상태의 시료를 초기함수비 100%로 조제하여 준설토의 시료 조제과정과 동일하게 30분 이상 교반하였고, 밀폐된 용기에 48시간 이상 방치한 후, Rowe cell에 스펀을 이용하여 초기높이 5.38cm까지 3단계로 나누어 투기하였다. 이 때 간극수가 cell 벽체를 통해 흐르는 것을 방지하기 위하여 cell내부 벽면에 그리드를 발랐으며, 시료를 cell내부에 정치할 때 시료내 간극이 발생하지 않도록 세심한 주의를 기울여 스펀으로 조심스럽게 다져가며 정치하였다. 하중재하단계 및 재하시간은 후술되는 준설점토의 Rowe cell시험과 동일하게 하였다.

##### 3.2 Rowe cell 압밀시험

Rowe cell 내 시료 정치시 셀의 벽면을 통해 물이 흐

르는 것을 방지하기 위해 그리즈를 바른 후 시료를 조심스럽게 스푼으로 소정의 위치까지 3단계에 걸쳐 투기한 후 잘 다져주었다. Rowe cell 내부에 준설토의 시료투기가 완료되면 셀 내부 및 diaphragm에 증류수를 채우고 셀 몸체와 상부를 타이볼트로 연결하였다. diaphragm 및 셀과 연결된 밸브에 수조를 연결하고 공기를 완전히 제거시킨 후 시료는 완전히 포화되었다고 가정하고 진공압에 의한 슬러리점토의 압밀을 방지하기 위해서 배압 및 진공압을 이용한 시료의 포화과정은 생략하였으며, 시간경과효과(aging effect)는 고려하지 않았다. 하중재하는 압밀추에 의하지 않고, Oil-Water System을 사용하였으며 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640kPa의 순으로 하였다. 이 하중재하장치는 임의의 하중을 일정하게 재하할 수 있으며 하중재하 범위는 0~3600kPa 까지 재하할 수 있다. 하중재하시간은 5kPa의 압밀하중에서는 2차 압밀현상까지 충분히 관측할 수 있도록 96시간동안 압밀을 시켰으며, 10kPa 이상부터는 48시간동안 재하하였다.

### 3.3 대형압밀시험

대변형이 발생하는 지반에 대한 Mikasa 이론의 타당성을 검증하기 위해 원통형 대형압밀시험기를 제작하여 압밀시험을 수행하였다. 대형압밀시험기의 구성은 Fig. 3과 같이 시료가 정치되는 투명한 원통형 아크릴 셀, 압력을 가하고 배수가 가능하도록 설계된 상부 덮개 및 간극

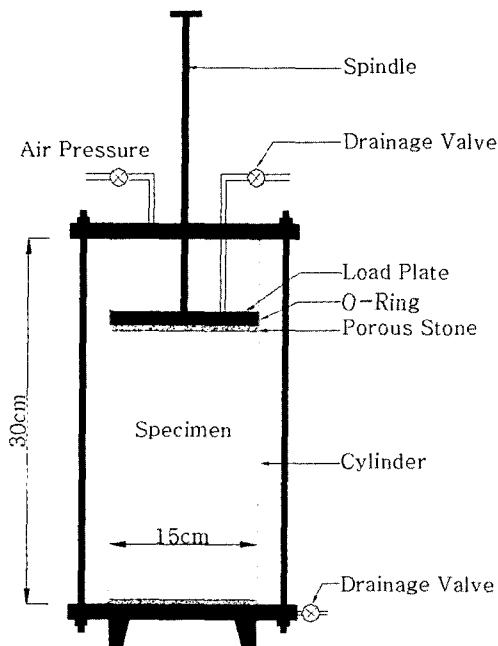


Fig. 3. Schematic diagram of large consolidation cell

수압 측정 및 하부배수장치가 설치된 저부로 이루어져 있으며, 원통형 셀을 중심부에 두고 상부와 저부는 tie bolt에 의해 조립되어진다. 압밀시험기의 제원은 높이는 30cm, 직경 15cm이고 하중재하판은 강성판으로 이루어져 있으며, 강성판 가장자리는 하중재하시 슬러리 및 간극수가 새어나오지 못하도록 O-ring을 설치하였으며, O-ring과 벽면마찰력이 5kPa로 측정되어 하중재하시 이를 보정하기 위하여 벽면마찰력 만큼 하중을 증가하여 재하하였다. 또한 간극수가 벽면을 따라 흐르는 것을 방지하기 위하여 셀 주변에 그리즈를 발라주었다.

## 4. 준설토의 압밀특성

### 4.1 압축지수

Fig. 4는 준설토의 압밀하중 증가에 따른 재성형점토와 준설토의 간극비의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 준설토는 선행하중이 나타나지 않으며, 곡선의 형상은 직선적이라기 보다는 아래로 약간 볼록한 형으로 낮은 하중에서 기울기가 매우 큼을 알 수 있다. 그러나 40kPa의 선행하중을 받은 재성형점토는 뚜렷히 선행하중의 영향을 보여주고 있으며, 선행하중 이후의 압축지수는 준설토와 유사한 경향을 보이고 있다. Table 2에 나타낸바와 같이 준설토는 40kPa-640kPa에서 평균 압축지수는 함수비 100%, 110%, 120%, 133%, 150%에서 각각 0.54, 0.58, 0.61, 0.63, 0.65의 값을 나타냈는데, 압밀하중 5kPa-20kPa에서는 0.80, 0.94, 1.08, 1.30, 1.50으로 매우 큰 값의 차이를 보이고 있다.

즉 준설토지반은 초기압밀하중에서 큰 침하를 일으키며, 점차 하중증가에 따른 침하량이 줄어드는 현상을 보였다. 하영튼 준설토는 하중의 증가에 따라 간극비의 변화 즉 침하가 매우 크게 일어난다. 따라서, 층 두께가 일정하다는 가정에 의한 기존 계산결과는 고풍수비 점토의 압밀현상을 잘 반영하지 못한다는 것을 알 수 있었다. Fig. 5는 함수비 변화에 따른 준설토의 압축지수를 회귀분석하여 나타낸 것이다.  $e - \log P$  곡선에서 40kPa를 경계로 하여 좌측곡선의 평균압축지수를  $C_{c-a}$ 라 하고, 우측곡선의 평균압축지수를  $C_{c-b}$ 라 하였으며, 이를 Fig. 5에서 보는 것처럼 구별하였다. 이를 토대로 현장의 함수비가 측정되면 개략적인 압축지수값을 산정할 수 있는 식 (3)과 식 (4)를 다음과 같이 제안하고자 한다.

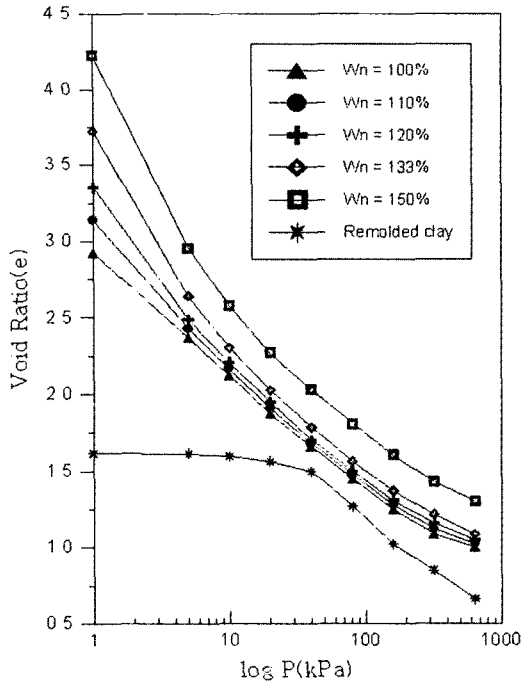


Fig. 4. e-logP curves remolded clay & dredged soil

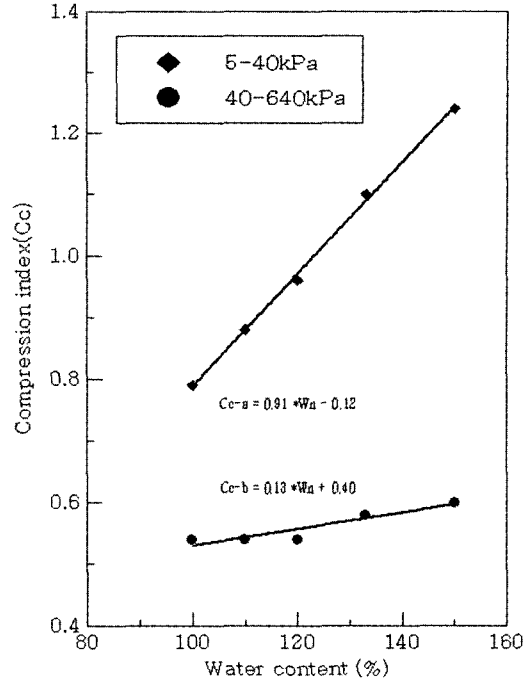


Fig. 5. Average compression indices for load stage of 0~40kPa and 80~640kPa

Table 2. Consolidation test results about dredged soil

No.	$w_w$ (%)	$H_0$ (cm)	$e_0$	$C_c$	
				0~40kPa	40~640kPa
C-1	100	5.41	2.92	0.80	0.54
C-2	110	5.28	3.14	0.94	0.58
C-3	120	5.31	3.35	1.08	0.61
C-4	133	5.12	3.72	1.30	0.63
C-5	150	5.34	4.23	1.50	0.65

Table 3. Compression and secondary compression indices

No.	$w_w$ (%)	$C_c$	$C_a$	$C_a'$	Remarks
C-1	100	0.67	0.034	0.051	Average
C-2	110	0.71	0.035	0.049	Average
C-3	120	0.75	0.036	0.048	Average
C-4	133	0.84	0.038	0.045	Average
C-5	150	0.91	0.037	0.041	Average

$$C_{c-a} = 0.91w_w - 0.12 \quad (3)$$

$$C_{c-b} = 0.13w_w + 0.40 \quad (4)$$

#### 4.2 2차압축지수

2차 압밀이란 압밀하중의 증가로 인해 발생한 과잉공극수압이 완전히 소산되었음에도, 계속적으로 침하를 일으키는 것을 말하는 것으로 본 연구에서 제작 사용된 함수비가 큰 준설햄토의 경우 2차 압밀특성이 함수비의 변화에 따라 어떤 경향을 보이는가 하는 것은 흥미로운 일이다.

Fig. 6은 하중증가에 따른 압축지수를 나타낸 것이고 Fig. 7은 압축지수와 2차압축지수와의 관계를 나타낸 것이다. 고휘수비를 갖는 준설햄토의 경우 2차 압축지수는 0.034, 0.035, 0.036, 0.038, 0.037로서 함수비의 변

화에 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있다. 즉, 동일한 시료에 함수비만을 가감해서 만든 것이기 때문에, 2차 압축특성은 시료자체가 갖는 고유의 값을 의미하는 것으로 결론지을 수 있다.

본 연구에 사용된 준설햄토의 압축지수비( $C_a'$ )는 초기 함수비가 높을수록 감소하는 경향을 보였는데 이는 함수비가 증가할수록 2차압축지수는 함수비에 영향을 받고 있지 않지만 압축지수값이 함수비가 증가함에 따라 증가하기 때문으로 판단된다. 본 연구에 사용한 준설햄토의 평균압축지수비는 0.047로 Mesri 등(1973)이 제안한 일반점토의 압축지수비  $C_a' = 0.04 \pm 0.01$ 의 범위와 유사하였으나, 김규선 등(2000)이 제안한 국내 서남해안지역의 압축지수값  $C_a' = 0.0397$ 보다는 0.007정도 높게 산정되었다.

### 4.3 준설점토의 압밀계수 특성

함수비가 큰 준설점토는 슬러리상태로 존재하므로 압밀계수에 대한 이방성은 없을 것이기 때문에, 수평압

밀계수는 연직압밀계수와 유사한 값을 가질 것으로 판단되어 본 시험에서는 고태수비를 갖는 준설점토에 대한 연직배수압밀시험을 통해 압밀계수를 산정하였다.

Fig. 8은 슬러리상태의 초기함수비 100%, 110%, 120%,

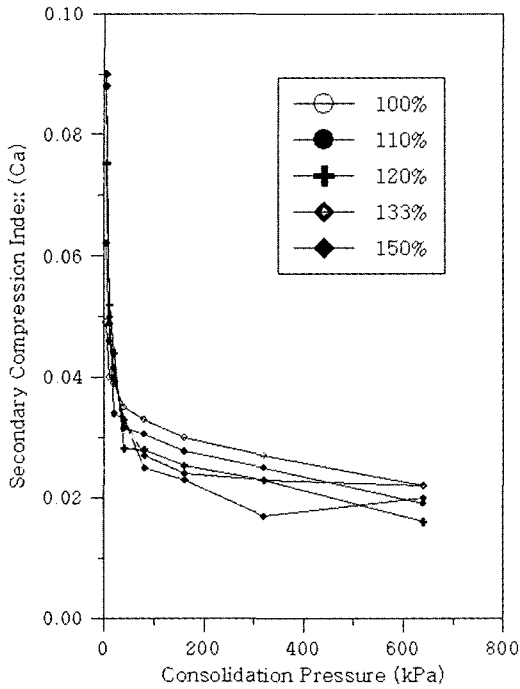


Fig. 6. Variation of secondary compression indices with load increase

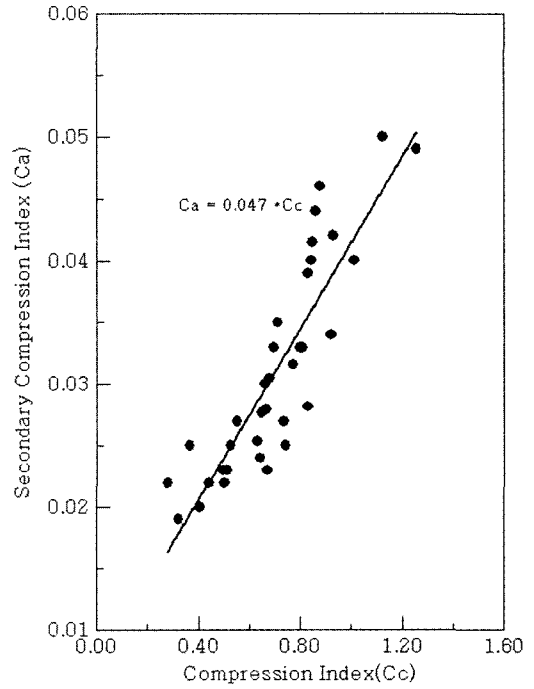


Fig. 7. Relationship of compression indices & secondary compression indices

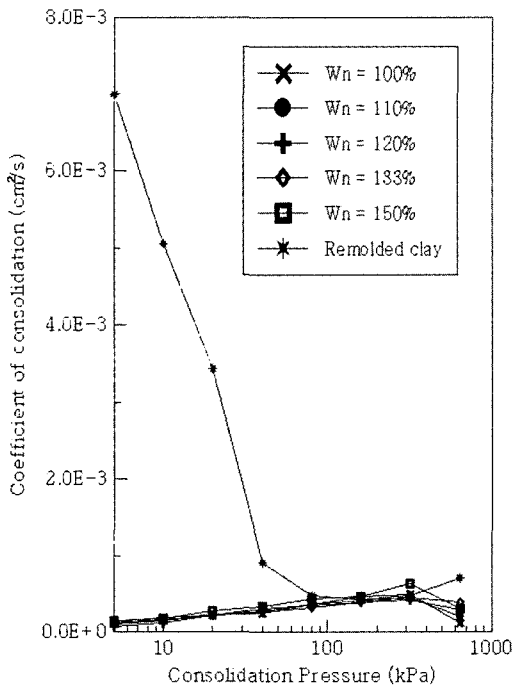


Fig. 8. Coefficients of consolidation of remolded and dredged clay

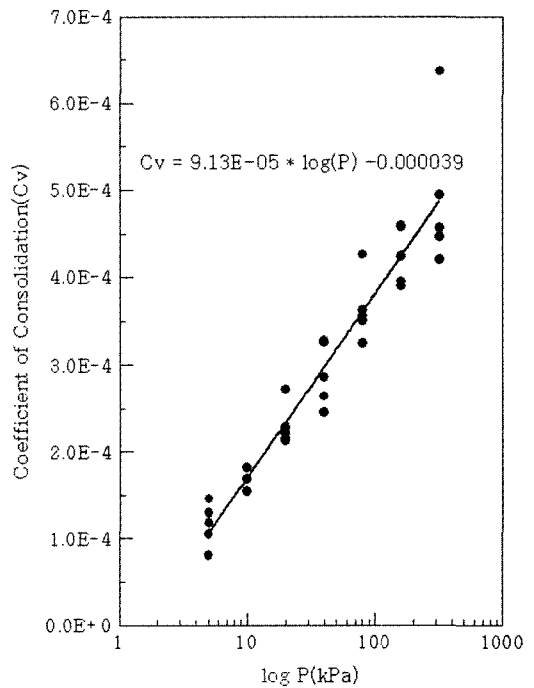


Fig. 9. Average coefficient of consolidation with load increase

133%, 150% 및 재성형준설토에 대한 연직압밀계수의 변화를 보여주고 있다. 재성형점토의 연직압밀계수는 선행압밀하중 이전에는 매우 큰 값을 나타내다 선행압밀하중을 기점으로 급격히 작아지는 정규압밀점토의 전형적인 압밀계수곡선을 나타내고 있지만 준설점토의 경우, 과소압밀점토로서 하중증가에 따라 계속 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Terzaghi의 압밀이론에서 투수계수( $k$ ), 체적변화계수( $m_v$ )와 압밀계수는 압밀중 변화하지 않는 것으로 가정하고 있다. 하지만, 투수계수와 체적변화계수는 압밀과정에서 상호보완적으로 변화하며 투수계수가 크면 체적변화계수도 크게 나타나고 역으로 체적변화계수가 작으면 투수계수도 작게 나타난다(Mikasa, 1963). 따라서, 투수계수는 간극비와 관계가 있고 간극비는 함수비에 따라 변화하며 함수비가 증가하면 투수계수가 증가한다고 말할 수 있다.

함수비 증가가 압밀계수의 변화에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴본 결과 함수비가 증가함에 따라 압밀계수가 약간씩 증가하는 경향을 나타내고 있지만, 그 값은 매우 작아 압밀계수의 증가에는 별다른 영향을 미치지 않음을 알 수 있고, 오히려 압밀하중의 증가에 따라 연직압밀계수가 증가하는 것으로 보아 준설점토의 연직압밀계수에 영향을 미치는 인자는 압밀하중으로 판단된다. 따라서, Fig. 9에서와 같이 하중증가에 대한 연직

압밀계수를 회귀분석하여 준설점토에 대한 연직압밀계수를 산정할 수 있는 다음 식을 제안하고자 한다.

$$c_v = (9.13E-05) \cdot \log P - 0.000039 (cm^2/sec) \quad (5)$$

#### 4.4 체적변화특성

Fig. 10은 하중증가에 따른 준설점토의 체적변화계수를 나타내고 있는데 그림에서와 같이 5kPa정도의 아주 작은 하중하에서도 그 변형정도는 전체변형률의 약 29~45%를 차지하고 있어 초기 변형이 대단히 큰 것을 알 수가 있으며 압밀 전과정을 거치면 49~56%로 큰 침하량을 보여준다. 체적변화의 정도는 준설점토의 압축지수특성과 유사하게 하중단계 40kPa까지는 매우 심하게 나타나고 있으며, 그 이후의 하중단계에서는 완만한 변화양상을 나타내고 있다.

미소변형이론에서와는 달리 대변형을 전제로한 Mikasa 이론에서 공칭변형률( $\bar{\epsilon}_p$ )은 1차압밀침하량과 압밀기간을 결정하는 시간계수( $T_v$ )를 결정하는데 있어서 큰 영향을 미친다. Fig. 11은 1차압밀침하량에 의한 준설점토의 체적비에 의한 최종 공칭변형률을 나타낸 것으로 여기서 산정된 변형률은 각 하중단계에서 변형률을 누적하여 계산한 것이다. 각 하중단계별 누적침하량은 함수비가 증가할수록 증가하고 있으며 준설점토의 초기함수비가 100%이고 하중단계 80kPa에서 준설점토의

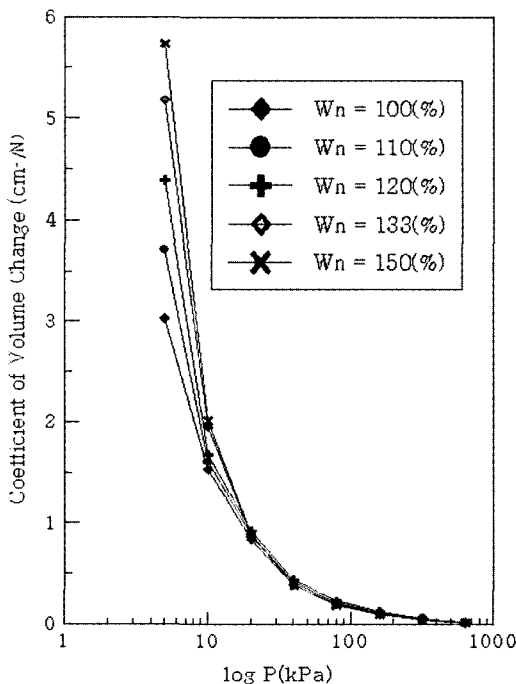


Fig. 10. Coefficient of volume change by load increase

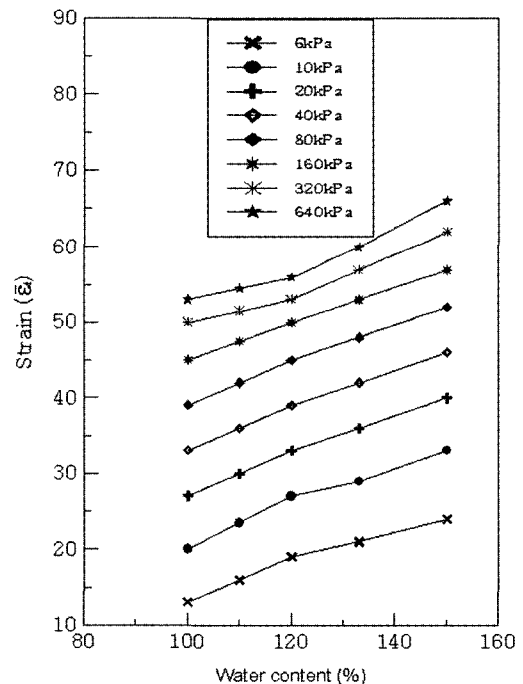


Fig. 11. Strain of dredged soil with variation of water content

Table 4. Strain of dredged soil with initial water content at load stage

$P(kPa)$	$\bar{\epsilon}_f(\%)$
5	$22w_n - 7.85$
10	$25w_n - 4.45$
20	$26w_n + 1.54$
40	$26w_n + 7.54$
80	$26w_n + 13.54$
160	$24w_n + 21.15$
320	$24w_n + 24.76$
640	$26w_n + 25.77$

1차압밀 완료시점에서의 누적변형률은 39.54%를 나타내고 있으나, 초기함수비 150%의 준설풀토의 경우 최종변형률이 52.54%로서 변형이 크게 발생함을 알 수 있다.

하중단계 5~640kPa에 대하여 각 하중단계별 준설풀토의 함수비와 변형률의 관계를 다음 Table 4에 나타내었으며 함수비변화에 따른 5종의 준설풀토에 대한 회귀분석결과로부터  $\bar{\epsilon}_f$ 의 산정식을 제안하였다. 다양한 토성에 대한 실험과 많은 데이터가 확보되지 못한 아쉬운 점이 있지만 본 연구에서 사용된 재료와 유사한 준설풀토반에서 Mikasa 이론에 의한 시간계수 산정이나 변형률에 의한 압밀침하량 산정시 대단히 유용한 자료로 이용될 수 있을 것이라고 판단된다.

## 5. 대형압밀시험에 의한 압밀기간 산정

### 5.1 Terzaghi와 Mikasa이론에 의한 압밀기간 예측

일반적으로 연약지반 개량공법은 배수거리를 짧게 하여 압밀기간을 단축시키는 pack drain이나 sand drain 공법이 적용되고 있고, 현재까지 알려지고 있는 연직배수재에 대한 해석은 모두 Terzaghi의 기본가정을 적용하고 있다. 하지만 압밀과정중 점토층의 두께변화를 고려하지 않는 Terzaghi의 이론을 큰 변형이 발생하는 준설풀토층에 적용한다면 배수거리가 길어져 실제 압밀기간 보다 더 길게 예측되어진다.

본 연구에서는 준설풀토지반의 압밀기간을 산정하는데 있어서 Mikasa이론의 적용성을 검증하기 위해 Rowe cell 압밀시험에 의해 산정된 압밀정수 즉, 시간계수 및 압밀계수를 적용하여 대형압밀시험 조건에 의한 압밀기간을 예측하여 보았다.

설계조건으로서 Table 5와 같이 초기함수비 98%에서

Table 5. Prediction of consolidation period by Terzaghi and Mikasa's theories

Applied Theories	$W_n$ (%)	$\bar{\epsilon}_f^*$ (%)	$(C_v)$ $cm^2/sec$	$T_v$	L (cm)	$t_{90}$ (day)
Terzaghi	98	33	1.93E-04	0.848	11.85	7.02
	148	46	2.31E-04	0.848	11.50	6.00
Mikasa	98	33	1.83E-04	0.460	11.85	4.08
	148	46	2.22E-04	0.355	11.50	2.60

Mikasa 이론을 적용하면 Rowe cell 압밀시험에 의한 하중단계 40kPa까지의 90% 압밀도에 도달하는 최종변형률은 제안식에 의해 33%로 계산되었고, 이 때의 시간계수는 0.460이었으며 하중단계 5~40kPa까지의 평균압밀계수는 1.83E-04( $cm^2/sec$ )이었다. 또한 Terzaghi이론에 의한 90% 압밀도에 해당하는 시간계수는 0.848이며 5~40kPa까지의 평균압밀계수는 1.93E-04( $cm^2/sec$ )로 산정되었다. 대형압밀시험에서 초기 층 두께는 23.7cm 이고 양면배수조건에서 배수거리는 11.85cm로 결정되어 상재하중이 40kPa이 재하될 때 Terzaghi이론에 의해 90% 압밀도에 도달하는 기간은 7.02일, Mikasa 이론에 의한 압밀기간은 4.08일로 예측되었다.

### 5.2 압밀기간에 대한 시험결과와 이론적 계산값 과의 비교

대형압밀시험에 의한 90% 압밀도에 도달하는 압밀

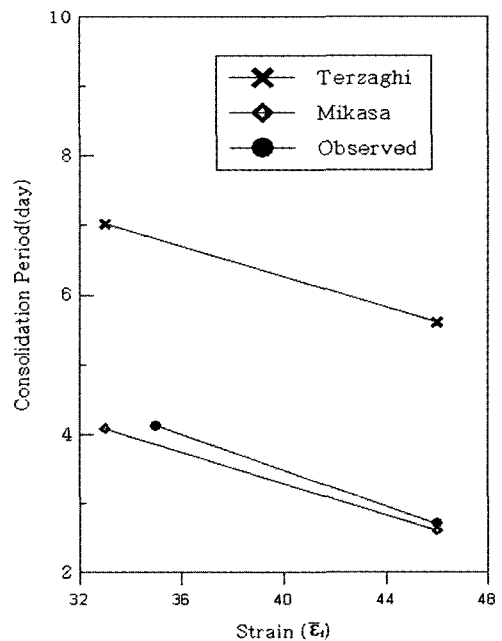


Fig. 12. Comparison with predicted and observed values for consolidation period



Table 6. Comparison of predicted and observed values of consolidation period by large consolidation tester

Applied Theories	Wn (%)	$\bar{\epsilon}_f$ (%)	$C_v$ ( $cm^2/sec$ )	$T_v$ ( $cm^2/sec$ )	L (m)	$t_{90}$ (day)
Terzaghi	98	33	1.93E-04	0.848	11.85	7.02
	148	46	2.31E-04	0.848	11.50	5.61
Mikasa	98	33	1.83E-04	0.460	11.85	4.08
	148	46	2.22E-04	0.355	11.50	2.60
Observed Values	98	35	1.78E-04	0.450	11.85	4.12
	148	46	2.01E-04	0.355	11.50	2.70

기간의 산정은 Taylor의 도해적 방법을 이용하여 산정하였다.

초기함수비 98%와 148%, 재하하중 40kPa에서 최종 변형률은 제안식에 의해 계산된 예측치와 거의 유사하게 나타났으며, 최종변형률에 해당하는 시간계수 또한 0.450과 0.355로 유사하게 산정되었다. 90% 압밀도에 도달하는 기간( $t_{90}$ )은 각각 4.12일과 2.60일로 산정되어 Fig. 12에서와 같이 초기함수비 98%에서 Terzaghi이론에서는 실측치와 약70%의 오차로 더 길게 예측되었고, Mikasa이론에서는 실측치와 약 1%의 오차로 더 짧게 예측되었다. 또한, 초기함수비 148%에서 Terzaghi이론에서는 실측치와 약 113%의 오차로 더 길게 예측되었고, Mikasa이론에서는 7.2%의 오차로 더 짧게 예측되었다.

위의 결과로 미루어 볼 때 준설토와 같은 고함수비 지반에서의 압밀기간 예측은 층 두께의 변화를 고려한 이론이 훨씬 합리적이라고 판단된다.

## 6. 결론

본 연구는 고함수비를 갖는 준설토의 압밀특성을 규명하기 위하여 재성형된 준설토와 함수비가 100%, 110%, 120%, 133%, 150%인 5종의 준설토에 대해 Rowe cell 압밀시험기를 이용해 압밀시험을 실시하였으며, 실험 결과로부터 고함수비 지반에 대한 압축지수, 2차 압축지수, 압밀계수 및 변형 특성 등을 분석하였다. 또 압밀과정중 층 두께의 변화를 고려하는 Mikasa의 압밀이론을 적용하여 준설투기된 지반의 압밀기간을 산정한 후 이를 실험결과와 비교함으로써 Mikasa 압밀이론의 정당성을 입증하였다. 본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 고함수비 지반에서의  $e - \log P$ 곡선의 형상은 약간 오목한 형으로 초기함수비가 높을수록 비선형적 거

동양상이 더욱 뚜렷하였으며, 하중단계 0~40kPa까지는 함수비의 증가에 따라 기율기의 변화가 현저하였고, 그 이후의 하중단계에서는 초기함수비에 관계없이 거의 유사한 압축지수값을 나타내고 있었다.

- (2) 준설토의 2차압축지수는 초기함수비변화에 관계없이 준설토 고유의 값이 존재함을 알 수 있었고, 준설토의 압축지수비( $c_a'$ )는 초기함수비가 높을수록 감소하는 경향을 보였는데 이는 함수비가 증가할수록 2차압축지수는 함수비에 영향을 받고 있지 않지만 압축지수값이 함수비가 증가함에 따라 더욱 더 큰 값이 나타나기 때문으로 판단된다. 또한 준설토의 압축지수비는 Mesri가 제안한 값과 유사하게 나타났다.
- (3) 준설토의 연직압밀계수는 하중증가에 따라 계속 증가하는 경향을 보였으나, 하중단계 640kPa에서 갑자기 감소하였다. 이는 압밀계수가 압밀소요시간을 결정하는 계수로서 일정수준 이상의 하중이 재하되면 압밀이 거의 완료되어 침하가 더 이상 발생되지 않기 때문으로 판단된다. 또한, 연직압밀계수는 초기함수비변화에 관계없이 거의 유사한 값을 나타내었고, 오히려 압밀하중의 크기가 연직압밀계수에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.
- (4) 준설토의 경우 함수비에 따라 전체변형률은 49~56%이고 초기하중 5kPa에서의 침하량은 전체침하량의 29~45%를 차지하고 있어 초기하중의 영향이 대단히 큰 것으로 나타났다.
- (5) 대형압밀시험기를 이용한 준설토의 모델시험 결과 준설토층과 같이 침하가 크게 발생하는 지반에서 압밀기간의 산정은 층 두께의 변화를 고려한 Mikasa의 이론은 약 10% 이하의 오차로 실측치와 근접하게 예측되었다. 그러나, 층 두께의 변화를 고려하지 않은 Terzaghi의 이론은 70% 이상의 오차로 더 길게 예측되어 준설패립지반의 더욱 정확한 압밀기간 설계를

위해서 압축변형률에 의한 Mikasa이론을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

(6) 압밀하중과 압밀계수, 압밀하중과 변형률의 관계식을 제안하였다.

## 참 고 문 헌

1. 김규선, 임형덕, 이우진 (2000), "실내압밀시험에 의한 남해안 해성점토의 Ca/Cc", 한국지반공학회논문집, 제15권 제6호, pp.8798.
2. 정규향 (2004), 고풍수비를 갖는 준설점토의 압밀특성, 전남대학교 대학원 박사학위논문, pp.77-87.
3. 三笠正人 (1963), 軟弱粘土 の 壓密, 東京, 麗島出判會.
4. Cargill, K. W. (1984), "Prediction of Consolidation of Very Soft Clay", *Journal Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.110, No.6, pp.775-795.
5. Mesri, G. (1973), "Coefficient of Secondary Compression", *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, Vol.99, No. SM1, pp.123-137.
6. Rowe, P. W. & Barden, L. (1966), A new Consolidation cell. *Geotechnique* 16, No.2, pp.162-170.

(접수일자 2004. 9. 13, 심사완료일 2004. 12. 17)