

## 변형률 이론에 의한 준설점토의 압밀기간 산정 Calculation of Consolidation Period for Dredged Clay by Strain Theory

정규향\* · 원용범\* · 이명호\* · 구본수\*

Gyu Hyang Cheong,\* Yong Beom Won,\* Myung Ho Lee\* and Bon Soo Koo\*

**요 지** : 고함수비상태로 준설투기된 준설점토지반에 지반개량을 위한 하중재하시 보통 점토지반에 비해 큰 압밀침하가 발생한다. 미소변형률을 전제로 하고 있는 기존의 열전도형 압밀방정식은 준설토지반과 같이 대변형이 발생하는 지반에 적용하기 어렵다. 따라서 준설토층과 같이 큰 변형이 발생하는 지반에서는 압밀과정 중 층 두께의 변화가 고려되어야 하는 압밀방정식을 적용해야한다. 본 연구에서는 층 두께의 변화를 고려한 압밀해석을 하고 이들의 결과와 층 두께의 변화를 고려하지 않은 기존 압밀해석의 결과와 비교·분석하였다. 이들로부터 변형률이 큰 지반에서의 압밀기간은 층 두께의 변화를 고려한 이론이 그렇지 않은 경우보다 실측치에 보다 근사하게 산정되었고, 압밀침하량의 경우는 압축지수에 의한 방법보다 변형률에 근거한 계산이 실측치에 매우 근접하게 산정되었다.

**핵심용어** : 압밀기간, 층두께의 변화, 대변형, 미카사이론

**Abstract** : Consolidation of dredged fill has become important task for site treatment. 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 compared the results 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.

**Keywords** : consolidation period, large strain, mikasa theory, variation of stratum thickness

### 1. 서 론

국내의 간척공사에 있어서 매립재료로 준설토가 많이 이용되고 있다. 이러한 준설토는 준설투기시 고함수비 상태로 배송관을 통해 투기장 호안 내에 투기된 후 건조수축과정을 거쳐 준설토층의 상부에 고결층을 형성하게 된다. 그러나, 하부는 여전히 고함수비 상태로 존재하게 되며, 이러한 초연약준설토 위에 지반개량을 위한 복토를 하는 경우, 적은 상재하중이 가해지더라도 매우 큰 압밀침하가 발생하는 경우가 많다. 이러한 이유로 시간경과와 토층의 깊이에 따른 간극수압을 규명하는 기존의 미소변형률 조건에 의해 유도되어진 압밀방정식은 적용이 불가능

할 뿐만 아니라 또한 간극수압 소산에 대한 신뢰성있는 자료가 거의 없는 실정이다(Mikasa, 1963). 따라서 본 연구에서는 미소변형률의 가정에서 유도된 압밀이론과 대변형의 조건에서 시간경과와 토층의 깊이에 따른 변형률을 계산하는 Mikasa이론에 의해서 준설점토의 압밀기간을 산정 비교·분석하였다. 이를 검증하기 위해 정규향(2004)이 제안한 준설점토층에 대한 하중증가 및 함수비 변화에 따른 압밀변수를 적용하여 준설점토에 대한 압밀기간을 예측하였고, 대형압밀시험을 수행하여 변형률 이론의 합리성을 검증함으로써 준설매립지반의 압밀기간을 효과적으로 산정하는 방법에 대해 제안하는 것을 목표로 하고 있다.

\*(주)유일종합기술단(Corresponding author: Gyu Hyang Cheong, Yooil Engineering Consultants Co., Ltd., #174-13, Dong Gyo Dong, Mapo-Ku, Seoul, Korea. cheonggh@hanmail.net)

## 2. 이론적 배경

Terzaghi(1925)는 체적압축계수( $m_v$ ), 압밀계수( $c_v$ ) 및 투수계수( $k$ )는 압밀과정중 일정하며 변화하지 않는다는 가정 하에서 다음과 같은 열전도형 형태의 1차원 압밀방정식을 유도하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

즉, 압밀이란 외부 압밀하중에 의해 발생한 과잉간극수압이 시간이 지남에 따라 소산되면서 침하하는 현상이다. 그러나, 압밀도중 투수계수, 체적변화계수, 압밀계수 및 층 두께 등의 변화가 무시되는 약점을 지닌다. 따라서, Mikasa(三笠正人, 1963)는 압밀도중 투수계수와 체적변화계수는 상호보완적으로 변하며 압밀계수가 일정하다고 가정하는 경우에 대해 변형률개념을 도입하여 다음과 같은 식 (2)를 제안하였다.

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

여기서,  $\varepsilon$ 는 압축변형률,  $c_v$ 는 압밀계수를 나타낸다.

식 (2)를 유도할 때에  $k$ 와  $m_v$ 가 일정하다는 가정을 사용하지 않았기 때문에, 그것들이 크게 변동한다고 하여도 그 비가 일정하다면  $c_v$ 가 일정한 식 (2)가 성립됨을 알 수 있다. 그러나 준설토의 경우 압밀중  $k$ 와  $m_v$ 는 압밀도중 크게 변하고, 심지어 1/1000-1/10,000정도 까지 감소하기도 한다. 그리고, Mikasa는 상기 식 (2)에 층 두께가 변하는 특성을 고려하여, 압밀비( $\zeta$ )에 관한 2계편미분 압밀방정식 (3)을 제안하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = c_v \zeta \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z_0^2} \quad (3)$$

여기서,  $\zeta = \frac{(\delta z)_0}{\delta z}$  (압밀비)  
 $(\delta z)_0$ : 점토요소의 처음 두께  
 $\delta z$ : 고려되고 있는 층의 두께

식 (3)에서 압밀량이 적을 경우  $\zeta \approx 1$ 이 되어 Terzaghi의 열전도형 방정식과 똑같은 형태가 되어 엄밀해에 의한 해석이 가능하나 압밀량이 크면 위의 식은 비선형이 되어 Table 1의 초기조건 및 경계조건을 이용하여 유한차분법에 의해 풀어야 한다. 식 (3)으로부터 시간계수를 결정하기 위해서 차분방정식 (4)를 이용한다.

**Table 1.** Initial condition and boundary condition by Mikasa theory

Initial condition		$\varepsilon=0$ or $\varepsilon=\varepsilon_f(z)$
Drainage		$\varepsilon=\varepsilon_f$
Boundary condition	Undrainage	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = 0$

$$\Delta \zeta_{z_0} = n^2 \cdot \Delta T \cdot \zeta_{z_0}^2 \cdot \frac{1}{4} (\zeta_{z_0+4z_0} - 2\zeta_{z_0} + \zeta_{z_0-4z_0}) \quad (4)$$

여기서,  $\Delta z_0: H_0/n$

$H_0$ : 초기상태에서의 점토층의 전체두께

$n$ : 점토층의 분할 간격

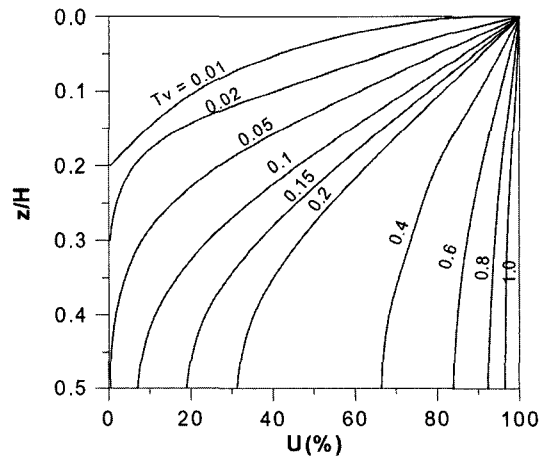
$\zeta = \Phi(T, z_0/H_0)$  와  $\bar{\varepsilon} = 1 - 1/\zeta$ 에 의해서  $\bar{\varepsilon} = \Psi(T, z_0/H_0)$ 의 관계로 고치면 평균압밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{z_0} = \frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f} \quad (5)$$

여기서,  $\bar{\varepsilon}$ : 공칭변형률

$\bar{\varepsilon}_f$ : 최종변형률

Fig. 1은 유한차분법에 의해 얻어진 결과로써  $\bar{\varepsilon}_f=0.2$ 에서 압밀도에 따른 시간계수곡선을 나타낸 것이다. Fig. 2는 최종변형률  $\bar{\varepsilon}_f$ 의 크기가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 바뀔 때 평균압밀도에 따른 시간계수의 변화를 나타낸 것이다. Mikasa가 제안한 압밀방정식을 이용하기 위해서는 최종변형률의 결정이 중요하다. 최종변형률  $\bar{\varepsilon}_f$ 를 결정하



**Fig. 1.** Isocron curve at.

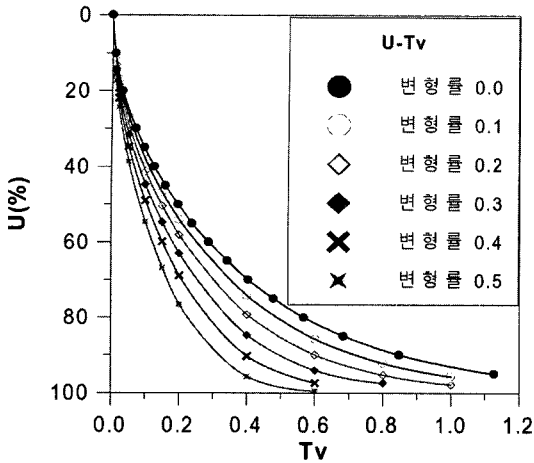


Fig. 2. with strain.

따라서 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. 여기서 최종변형률이란 최종압밀침하량을 압밀층의 두께로 나눈 값을 말한다.

### 3. 시료제작 및 실험

#### 3.1 사용시료

본 연구에 사용된 시료는 서남해안 울릉준설점토를 사용하였으며 표층으로부터 1m 이하에서 Slurry 상태로 시료를 채취하였다. 고함수비를 갖는 시료를 제작하기 위해서 현장상태의 시료에 적절하게 증류수를 첨가하였는데, 제작된 시료는 함수비가 98%, 130%, 148%로서 액성한계 50%의 2배 이상이 되는 초연약준설토라 할 수 있다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 Table 2에 나타낸바와 같이 비중 2.69, 액성한계 50%, 소성지수 20, pH 6.83으로서 흙의 종류는 통일분류법상 CH에 해당되었다.

#### 3.2 대형압밀시험

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

Table 2. Physical properties of dredged soil

Ww (%)	98, 130, 148
Gs	2.69
LL (%)	50
PI	20
USCS	CH
P200 (%)	99.8
Organism content (%)	2.35
pH	6.83

압 측정 및 하부배수장치가 설치된 저부로 이루어져 있으며, 원통형 셀을 중심부에 두고 상부와 저부는 tie-bolt에 의해 조립되도록 제작하였다. 압밀시험기의 높이는 30cm, 직경 15cm이고 하중재하판은 강성판으로 이루어져 있으며, 강성판 가장자리는 하중재하시 슬러리 및 간극수가 새어나오지 못하도록 O-ring을 설치하였으며, O-ring과 벽면마찰력이  $0.5t/m^2$ 로 측정되어 하중재하시 이를 보정하기 위하여 벽면마찰력 만큼 하중을 증가하여 재하하였다. 또한 간극수가 벽면을 따라 흐르는 것을 방지하기 위하여 셀 주변에 그리드를 발라주었다.

정규향(2004)은 준설점토의 e-logP 곡선에서 압밀하중 40kPa까지 압축정수들의 변화가 현저하고 그 이후 하중 단계에서는 완만한 형상을 보인다고 하였다. 따라서 본 연

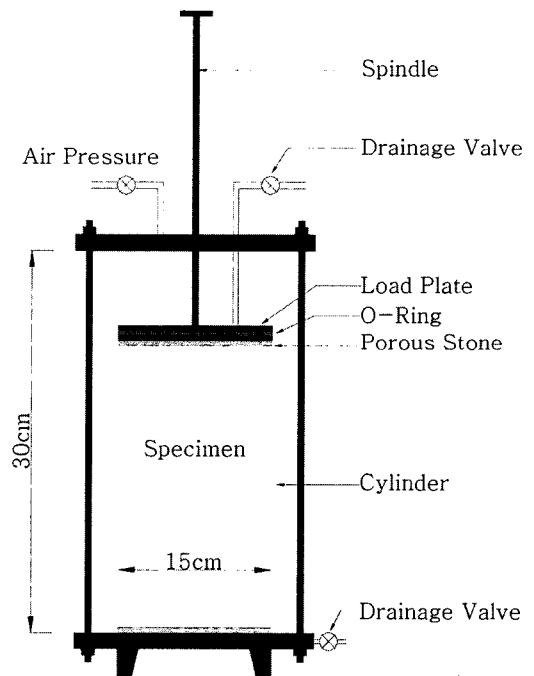


Fig. 3. Schematic diagram of large consolidation cell.

구에서는 3종류의 시료에 대해서 재하하중은 40kPa로 하였고, 재하시간은 일본의 시험 규정을 참고하여 1차압밀 완료시점의 약 3배로 하였다. 시료의 높이와 직경은 Table 3에 나타냈고 배수조건은 모두 양면배수로 하였다.

시험방법으로 원통형 셀 저판에는 증류수로 포화된 배수재를 설치하고 배수밸브를 잠근상태로 준설토를 투기하였으며, 투기하는 과정에서 간극이 발생하지 않도록 조심스럽게 시료를 다져가며 준설토를 투기하였다. 소정의 두께까지 준설토를 투기한 후 준설토 상부표면에 포화된 배수재를 설치하여 양면배수가 가능하도록 하였다. O-ring 이 부착된 하중 재하판을 설치하고 시험기의 저부와 상부 덮개를 tie-bolt에 의해 조립한 후, 상부판에 공기압(air pressure)을 전달하여 등변형률 조건하에서 양면배수 압밀 시험을 실시하였다. 본 시험기를 이용한 하중단계별 시료의 압밀침하량은 재하판의 연직변형량을 다이알게이지로 읽어서 측정하였으며, 압밀시험이 완료되면 시험기를 해체하여 점토시료를 꺼낸 다음 함수비를 측정하여 초기간극비를 계산하였다.

#### 4. 대형압밀시험에 의한 압밀기간 산정

##### 4.1 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 대 변형이 발생하는 준설매립토층에 적용한다면 배수거리가 길어져 실제 압밀기간 보다 더 길게 예측되어진다.

본 연구에서는 준설매립지반의 압밀기간을 산정하는데 있어서 Mikasa이론의 적용성을 검증하기 위해 정규향 등(2004)에 의해 제안된 압밀정수 즉, 변형률 및 압밀계수를 적용하여 대형압밀시험에 의한 압밀기간을 예측하여 보았다. 제안된 압밀계수 및 변형률은 다음 식(6) 및 Table

**Table 3.** Initial condition of large consolidation test for very soft clay

$W_n(\%)$	$e_0$	$H_0(\text{cm})$	$D(\text{cm})$	Drainage condition
98	2.92	23.7	15.0	Double drainage
130	3.65	23.4	15.0	Double drainage
148	4.23	23.0	15.0	Double drainage

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

$P(\text{t/m}^2)$	$\bar{\epsilon}_f (\%)$
0.5	$22w_n - 7.85$
1.0	$25w_n - 4.45$
2.0	$26w_n + 1.54$
4.0	$26w_n + 7.54$
8.0	$26w_n + 13.54$
16.0	$24w_n + 21.15$
32.0	$24w_n + 24.76$
64.0	$24w_n + 25.77$

4와 같다.

$$c_v = (9.13E-05) \cdot \log P - 0.000039 (\text{cm}^2/\text{sec}) \quad (6)$$

설계조건으로서는 Table 5와 같이 초기함수비 98%에서 Mikasa 이론을 적용하면 Rowe cell 압밀시험에 의한 하중단계 4.0t/m<sup>2</sup>까지의 90% 압밀도에 도달하는 최종변형률은 제안식에 의해 33~46%로 계산되었고, 이때의 시간계수는 0.460~0.355이었으며 하중단계 4.0까지의 평균 압밀계수는 1.83E-04~2.22E-04이었다. 또한 Terzaghi이론에 의한 90% 압밀도에 해당하는 시간계수는 0.848이며 4.0t/m<sup>2</sup>까지의 평균압밀계수는 1.93E-04~2.31E-04로 산정되었다. 대형압밀시험에서 초기 층 두께는 함수비 98.0~148%에서 11.85~11.50cm로 결정되어 상재하중이 4.0t/m<sup>2</sup> 이 재하될 때 Terzaghi이론에 의해 90% 압밀도에 도달하는 기간은 7.14~5.62일, Mikasa 이론에 의한 압밀기간은 4.09~2.45일로 예측되었다.

##### 4.2 압밀기간에 대한 시험결과와 이론적 계산값과의 비교

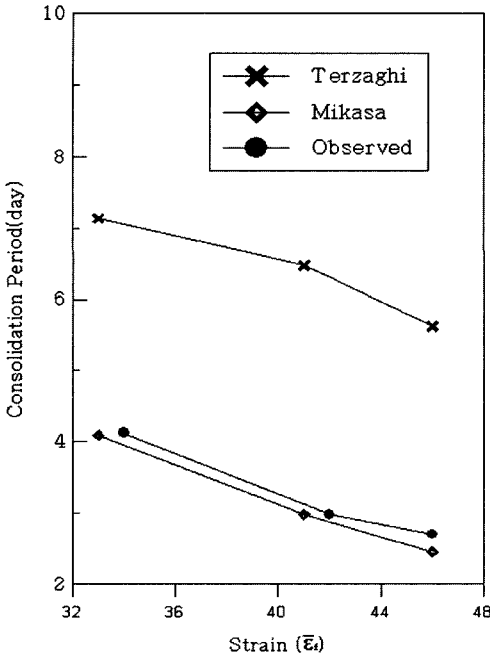
대형압밀시험에 의한 90% 압밀도에 도달하는 압밀기간의 산정은 Taylor의 도해적 방법을 이용하여 산정하였다.

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

Applied Theories	$W_n (\%)$	$\bar{\epsilon}_f^* (\%)$	$C_v (\text{cm}^2/\text{sec})$	$T_v$	$L (\text{cm})$	$t_{90} (\text{day})$
Terzaghi	98	33	1.93E-04	0.848	11.85	7.14
	130	41	2.01E-04	0.848	11.52	6.48
	148	46	2.31E-04	0.848	11.50	5.62
Mikasa	98	33	1.83E-04	0.460	11.85	4.09
	130	41	1.96E-04	0.380	11.52	2.98
	148	46	2.22E-04	0.355	11.50	2.45

**Table 6.** Observed values of consolidation period by large consolidation tester

Observed Values	$W_n$ (%)	$\bar{\epsilon}_f$ (%)	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /sec)	$T_v$	$L$ (cm)	$t_{90}$ (day)
	98	34	1.78E-04	0.450	11.85	4.11
	130	42	1.91E-04	0.370	11.52	2.98
	148	46	2.01E-04	0.355	11.50	2.70



**Fig. 4.** Comparison with predicted and observed values for consolidation period.

Table 6에 나타낸바와 같이 초기함수비 변화에 따라 재하하중 4.0t/m<sup>2</sup>에서 최종변형률은 34~46%로 계산식에 의해 계산된 예측치와 거의 유사하게 나타났으며, 최종변형률에 해당하는 시간계수 또한 0.450~0.355로 유사하게 산정되었다. 90% 압밀도에 도달하는 기간( $t_{90}$ )은 각각 4.11~2.70일로 산정되어 Fig. 4에서와 같이 초기함수비 98%에서 Terzaghi이론에서는 실측치와 약73%이상의 오차로 더 길게 예측되었고, Mikasa이론에서는 실측치와 약 9%이하의 오차로 더 짧게 예측되었다. 위의 결과로 미루어 볼 때 준설토와 같은 고태수비 지반에서의 압밀기간 예측은 층 두께의 변화를 고려한 이론이 훨씬 합리적이라고 판단된다.

### 5. 결 론

고함수비를 갖는 준설점토의 압밀기간을 예측하기 위하여 대형압밀시험기를 이용한 준설점토의 모델시험을 수행한 결과 준설점토의 압밀계수 및 변형률은 정규향(2004)이 제안한 값과 거의 유사하게 산정되었다. 또한 준설점토의 압밀기간을 예측한 결과 준설토층과 같이 침하가 크게 발생하는 지반에서 압밀기간의 산정은 층 두께의 변화를 고려한 Mikasa의 이론이 약 9% 이하의 오차로 실측치와 근접하게 예측되었고, 층 두께의 변화를 고려하지 않은 Terzaghi의 이론은 73% 이상의 오차로 더 길게 예측되었다. 따라서 대변형이 발생하는 지반에서 압밀기간 산정시 변형률이론을 이용한다면 기존의 압밀방정식보다 훨씬 합리적인 압밀기간을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

정규향 (2004). 고태수비를 갖는 준설점토의 압밀특성. 박사학위논문, 전남대학교.  
 Crawford, C. B. (1964). Interpretation of the consolidation tests. Soil mech. Found. Div. ASCE, 90, 93-108.  
 Leonards, G. A. and Raniah, B. K. (1960). Time effects in the consolidation of clays. ASTM, Special Technical Publication 254, 116-130.  
 Marasimha Raju, P. S. R., Pandian, N. S. and Nagaraj, T. S. (1995). Analysis and estimation of the coefficient of consolidation. Geotechnical Testing Journal, 18(2), 252-258.  
 Mesri, G. and Castro, A. (1987). The  $C_d/C_c$  concept and  $K_0$  during secondary compression. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 113(GT3), 230-247.  
 Rowe, P. W. and Barden, L. (1966). New consolidation cell. Geotechnique, 16, 162-170.  
 Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics. Wiley, New York.  
 三笠正人 (1963). 軟弱粘土の 壓密. 東京, 麗島出版會.

Received November 10, 2004

Accepted February 3, 2005