

## 슬러리점토의 압밀특성 Consolidation Characteristics of Slurry Clay

정규향\* · 정종진\* · 김교준\*\* · 윤석군\*\*\*

Gyu Hyang Cheong\*, Jong Jin Cheong\*, Gyo Jun Kim\*\* and Suk Gun Yoon\*\*\*

**요 지 :** 매립재로 이용되는 준설풍토는 일반적으로 함수비가 매우 크며, 작은 압밀하중이 작용하더라도 큰 침하가 일어나는 특성을 지닌다. 이러한 초연약지반을 개량하는 공법설계를 위해서는 압밀특성을 구하는 실험이 실시되어야 한다. 그러나 일반적인 표준압밀시험방법으로는 슬러리상태의 흙이 압밀링의 벽면을 타고 상하부로 흘러나오기 때문에 실험이 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 Rowe cell 시험기를 사용하여 준설풍토에 대한 압밀시험을 실시하였으며, 함수비의 변화가 압밀특성에 주는 영향을 검토하기 위해서 함수비를 100%, 110%, 120%, 133%, 150% 등 5종류로 변화시켜서 실험을 실시하였다. 실험결과로부터 준설풍토의 개량을 위한 설계를 하는 경우, 실제 압밀시험을 하지 않고도, 현장 함수비가 측정되면 개략적인 압축지수와 압밀계수 및 변형률을 예측할 수 있는 식을 제안하였다.

**핵심용어 :** 슬러리점토, Rowe cell, 압밀계수, 압축지수, 변형률

**Abstract :** Dredged soil from sea has much higher water content than liquid limit of clay and even if small loads apply, it will suffer a great settlement. Therefore it is very difficult to perform a consolidation test with general consolidation apparatus because of high water content. In this study Rowe cell apparatus consolidation tests have been performed with 5 slurry clays of a water content of 100%, 110%, 120%, 133%, and 150%. From the test results the consolidation characteristics such as compression index, secondary compression index, consolidation coefficient, and strain have been investigated with a variation of water content of dredged soil. The equations to get consolidation constants such as a compression index, a coefficient of consolidation, and strain have been proposed with the field water content.

**Keywords :** slurry clays, Rowe cell, coefficient of consolidation, compression index, strain

### 1. 서 론

준설풍토공사는 항만단지 및 산업단지를 조성하기 위해 가토제를 축조한 후 산토나 준설풍토를 가토제 내에 계획고까지 투기하는 것을 말한다. 과거에는 매립재료로 주위에서 손쉽게 구할 수 있는 산토를 주로 이용하였으나 최근에는 환경문제 등으로 인해 해성점토를 직접 준설풍하여 고함수비 상태로 배송관을 통해 가토제 내 준설풍토지역으로 투기하고 있다. 가토제 내에 투기된 준설풍토는 시간 경과에 따라 침강 및 자중압밀 과정을 거쳐 상부는 고

결건조층을 형성하지만 하부는 여전히 액성한계 두 배 이상의 고함수비 상태를 유지하고 있어 액체상태와 유사한 거동을 한다.

이러한 고함수비 상태의 준설풍토는 성형이 어렵고 토립자가 압밀셀의 상하부로 흘러나오기 때문에 기존의 표준압밀시험기로는 압밀시험이 불가능하다. 이러한 이유로 준설풍토지반 위에 지반개량을 위한 복토시 준설풍토의 압밀변수에 대한 자료가 거의 없어 압밀침하량 및 압밀기간을 예측하는데 많은 문제점을 야기하고 있다. 본 연구에서는 다양한 고함수비를 갖는 준설풍토를 조제하여 슬러리

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

\*\* (주)동아기술공사(Dong-A Engineering Co., Ltd.)

\*\*\* 농업기반공사(Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation)

상태의 압밀시험이 가능한 Rowe cell 시험기를 이용하여 압밀시험을 실시하였고, 압밀시험 결과를 바탕으로 각종 압밀정수들을 분석하였다.

## 2. 압밀시험

### 2.1 Rowe cell 압밀시험

Rowe and Barden(1962)에 의해서 개발된 Rowe cell 시험기는 시료와 압밀링간의 마찰력을 감소시킬 수 있고, 간극수압을 측정할 수 있으며 또한 함수비가 커서 성형이 안되는 준설토를 실험할 수 있는 장점이 있다. 본 시험기는  $0\sim 360t/m^2$ 의 압밀하중을 가할 수 있는 장치이며 다양한 시험조건을 갖는 수평배수압밀시험과 연직배수압밀시험이 가능하다.

### 2.2 시료조제

본 연구에 사용된 시료는 전라남도 울촌지역의 표층으로부터 1 m 이하에서 채취한 해성점토로서 고함수비 상태에서 불교란시료를 채취하는 것이 매우 어렵기 때문에, 시료를 교란된 상태로 채취하였고 체가름시험 결과 #200통과량이 98% 이상이었다. 시료조제는 현장함수비를 측정하여 소정의 초기함수비 상태에 필요한 만큼의 증류수를 첨가하여 충분히 교반하고 시료의 포화를 위해 48시간 이상 충분히 방치한 후 원통형 압밀셀에 투기하였다. 제작된 시료는 함수비가 100%, 110%, 120%, 133%, 150%로서 액성한계의 2배 이상이 되는 초연약준설토이고 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같이, 비중 2.69, 액성한계 50%, 소성지수 30, P200 99.8%, pH 6.83, 유기물 함량 2.35%로서 흙의 종류는 통일분류법상 고압축성 점토인 CH로 분류되었다.

### 2.3 압밀시험

Rowe cell 내 시료 정치시 셀의 벽면을 통해 물이 흐르는 것을 방지하기 위해 그리드를 바른 후 시료를 조심

Table 1. Physical properties of dredged soil

$w_w$ (%)	95
$G_s$	2.69
LL (%)	50
PI	30
USCS	CH
P200 (%)	99.8
Organic content (%)	2.35
pH	6.83

스럽게 스푼으로 소정의 위치까지 3단계에 걸쳐 투기한 후 잘 다져주었다. Rowe cell 내부에 준설토의 시료투기가 완료되면 셀 내부 및 diaphragm에 증류수를 채우고 셀 몸체와 상부를 다이볼트로 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 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 32.0,  $64.0t/m^2$ 의 순으로 재하 하였다. 이 하중재하장치는 임의의 하중을 일정하게 재하 할 수 있으며 하중재하 범위는  $0\sim 360t/m^2$  까지 재하할 수 있다. 하중재하시간은  $0.5t/m^2$ 의 압밀하중에서는 2차 압밀현상까지 충분히 관측할 수 있도록 96시간동안 압밀을 시켰으며,  $1.0t/m^2$  이상부터는 48시간동안 재하하였다.

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 초기간극비 및 단위중량

압밀에 있어서 초연약점토의 간극비와 단위중량의 산정은 압밀침하량 및 압밀하중을 결정하는데 있어서 대단히 중요한 인자이므로 본 연구에서는 5종의 압밀시험을 하는 과정에서 함수비( $w_n$ )에 따른 간극비 및 단위중량의 상관관계를 분석하였다. 초기포화도는 96%로 현장상태를 재현하기 위해 시료를 정치한 다음 일정기간 방치한 후에 초기 간극비( $e_0$ ) 및 단위중량( $\gamma$ )을 측정된 결과는 Fig. 1 및 Fig.

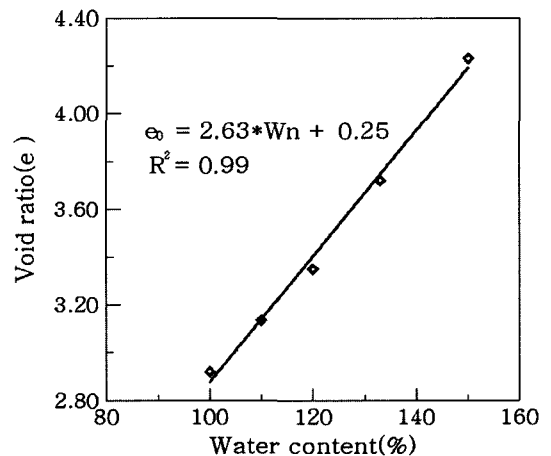


Fig. 1. Void ratio with variation of water content.

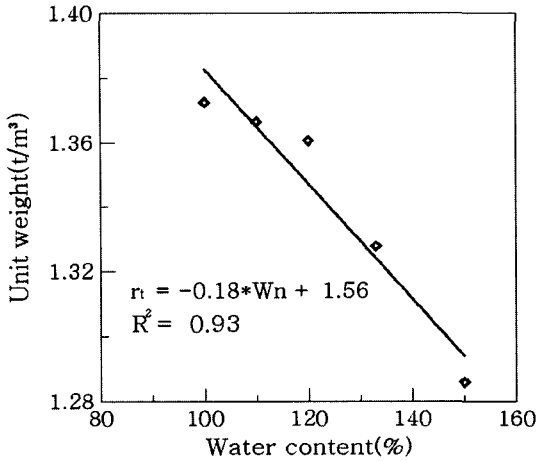


Fig. 2. Unit weight with change of water content.

2와 같으며 이를 식으로 나타내면 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$e_0 = 2.63w_n + 0.25 \quad (1)$$

$$\gamma_t = -0.18w_n + 1.56 \quad (2)$$

### 3.2 함수비 변화에 따른 압축지수 특성

함수비가 100%~150%에 이르는 준섫점토 및 재성형준섫토에 대한 평균압축지수 및 초기간극비를 Table 2에,  $e$ - $\log P$  곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 초기간극비는 함수비가 증가함에 따라 커져 함수비 150%에서는 4.23으로서 매우 큰 값을 보이고 있는데 이처럼 함수비가 큰 준섫점토는 흙 입자 사이에 자유수층이 두터워서 정규압밀점토와는 다른 침하특성을 보이고 있다. 압축곡선의 형상은 직선적이라기보다는 약간 오목한 형상으로 낮은 압밀하중에서 기울기가 매우 크게 나타나고 있고 함수비 100%에서의 압축곡선은 거의 선형적으로 나타나고 있으나, 초기간극비가 증가할수록  $e$ - $\log P$  곡선의 비선형적 거동이 현저함을 알 수가 있었다.

평균압축지수는 초기 함수비가 증가함에 따라 각각 0.67, 0.71, 0.75, 0.84, 0.91로서 함수비가 증가함에 따라

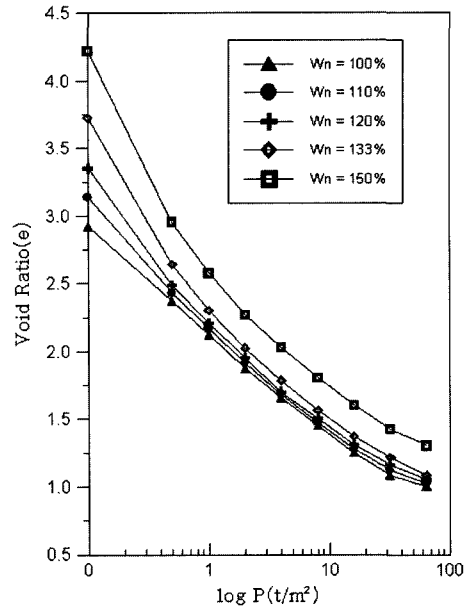


Fig. 3.  $e$ - $\log P$  curves with change of water content.

커지지만, 그 증가속도가 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3은 함수비 증가에 따른 각 하중단계별 압축지수를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 함수비 증가에 따른 압축지수의 변화양상은 초기하중단계( $0.5t/m^2$ )에서 기울기가 가장 급하게 나타나고 압밀하중이 증가할수록 완만한 형상의 기울기를 나타내고 있다. 다시 말하면, 하중단계  $4.0t/m^2$ 까지 각 하중단계별 함수비 증가에 따라 압축지수 값은 증가하고, 하중단계  $4.0t/m^2$  이상에서는 함수비 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

준섫점토의  $e$ - $\log P$  곡선을 보면 선형하중은 나타나지 않으며 압밀하중의 크기에 따라 압축지수의 변화가 크다. 초기 낮은 압밀하중 즉, 약  $4.0t/m^2$  이하에서는 압축지수가 크며, 그 이후는 압축지수가 작아 기존의 방법처럼 전체 평균을 압축지수로 하여 실제 설계에 사용할 경우, 침하량을 과소평가하게 된다. 따라서, 후술되는 3.2절의 Fig. 5를 근거로 하여  $e$ - $\log P$  곡선에서  $4.0t/m^2$ 를 경계로 함수비 변화에 따른 좌측곡선의 평균압축지수를  $C_{c-a}$ 라 하고, 우

Table 2. Results of consolidation test for dredged and remolded clay

No.	$W_w$ (%)	$H_0$ (cm)	$e_0$	$c_c$
Slurry-1	100	5.41	2.92	0.67
Slurry-2	110	5.28	3.14	0.71
Slurry-3	120	5.31	3.35	0.75
Slurry-4	133	5.12	3.72	0.84
Slurry-5	150	5.34	4.23	0.91

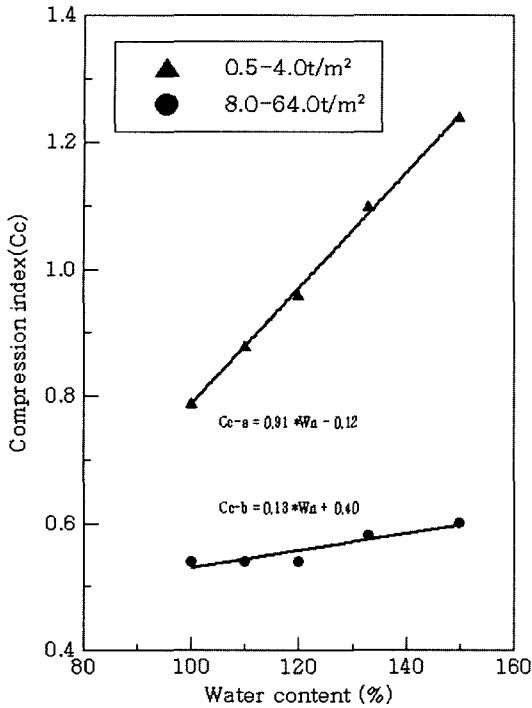


Fig. 4. Average compression indices for load stage of 0.0-4.0t/m<sup>2</sup> and 8.0-64.0t/m<sup>2</sup>.

측곡선의 평균압축지수를  $C_{c,b}$ 라 하였으며, 이를 Fig. 4에서 보는 것처럼 구별하였다. 따라서, 이를 토대로 현장의 함수비가 측정되면 개략적인 압축지수값을 산정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하고자 한다.

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

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

본 제안식은 준설점토의 시간경과효과와 선행하중을 고려하지 않았으며, 토질특성에 따라 다양한 실험이 이루어지지 못한 아쉬운 점은 있지만, 본 논문에 적용된 토질특성과 유사한 지반에 대해서 현장함수비가 측정되면 손쉽게 압축지수를 산정할 수 있는 식이라고 판단된다.

### 3.3 준설점토의 2차압축특성

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

Table 3. Compression and secondary compression indices

No.	$W_w$ (%)	$c_c$	$c_a$	$c_\alpha$	Remarks
Slurry-1	100	0.67	0.034	0.051	Average
Slurry-2	110	0.71	0.035	0.049	Average
Slurry-3	120	0.75	0.036	0.048	Average
Slurry-4	133	0.84	0.038	0.045	Average
Slurry-5	150	0.91	0.037	0.041	Average

본 연구에 사용된 준설점토의 압축지수비( $c'_a$ )는 Table 3에서와 같이 초기함수비가 높을수록 감소하는 경향을 보였는데 이는 함수비가 증가할수록 2차압축지수는 함수비에 영향을 받고 있지 않지만 압축지수값이 함수비가 증가함에 따라 증가하기 때문으로 판단된다. 본 연구에 사용한 준설점토의 평균압축지수비는 Fig. 6에서와 같이 0.047로 Mesri and Castro(1987)가 제안한 일반점토의 압축지수비  $c'_a = 0.04 \pm 0.01$ 의 범위와 유사하였으나, 김규선 등(1999)이 제안한 국내 서남해안지역의 압축지수값  $c'_a = 0.0397$  보다는 0.007정도 높게 산정되었다.

Fig. 5는 압밀압력의 증가에 따른 압축지수의 변화를 나타낸 것이다. 압축지수의 경우, 압밀압력 4.0t/m<sup>2</sup>까지는 압밀압력의 증가에 따라 매우 급한 기울기를 나타내고 있으나, 4.0t/m<sup>2</sup> 이후의 하중단계에서는 비교적 완만한 기울기를 나타내고 있고, 기울기의 정도는 초기함수비가 높을수록 더욱 급하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 위의 사

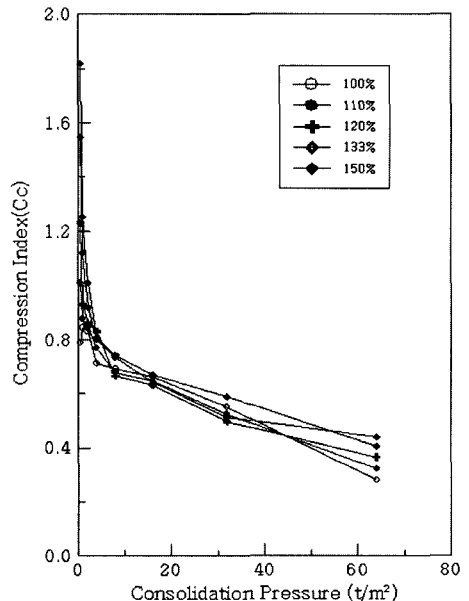


Fig. 5. Variation of compression indices with load increase.

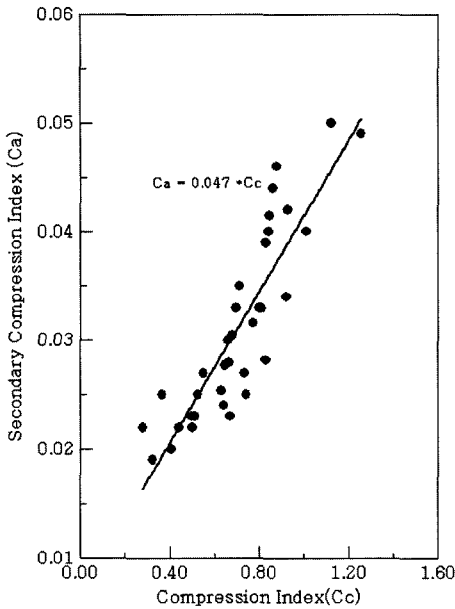


Fig. 6. Relationship of compression indices & secondary compression indices.

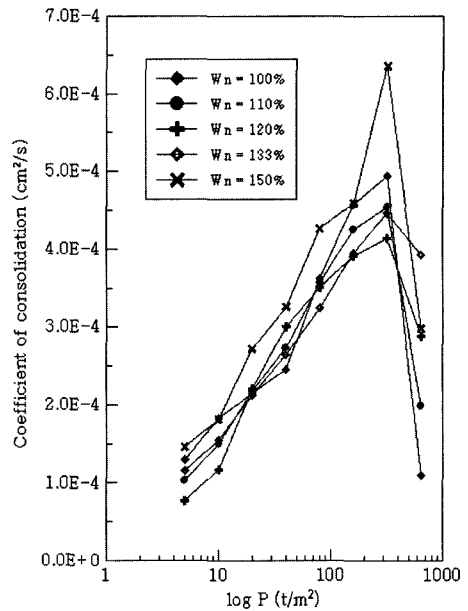


Fig. 7. Coefficients of consolidation of remolded and dredged clay.

실로 미루어 보아 하중단계  $4.0t/m^2$  이하에서 압축지수에 대한 초기함수비의 영향이 대단히 큰 것으로 판단되었다.

### 3.4 준설점토의 압밀계수 특성

함수비가 큰 준설점토는 슬러리상태로 존재하므로 압밀계수에 대한 이방성은 없을 것이기 때문에, 수평압밀계수는 연직압밀계수와 유사한 값을 가질 것으로 판단되어 본 시험에서는 고함수비를 갖는 준설점토에 대한 연직배수압밀시험을 통해 압밀계수를 산정하였다.

Fig. 7은 슬러리상태의 초기함수비 100%, 110%, 120%, 133%, 150%에 대한 연직압밀계수의 변화를 보여주고 있고, Fig. 8은 함수비 변화에 따른 준설점토의 연직압밀계수를 나타낸 것인데 하중증가에 따라 계속 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하중단계  $64.0t/m^2$ 에서 압밀계수가 갑자기 감소하였는데 이는 압밀계수가 압밀속도를 나타내는 계수로서 이 하중단계에서 압밀이 거의 완료되어 감소되어진 것으로 판단된다.

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, 1964). 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. 8에서와 같이 하중증가에 대한 연직압밀계수를 회귀분석하여 준설점토에 대한 연직압밀계수를 산정할 수 있는 다음 식을 제안하고자 한다.

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

### 3.5 체적변화특성

Fig. 9는 하중증가에 따른 준설점토의 체적변화계수를 나타내고 있는데 그림에서와 같이  $0.5t/m^2$  정도의 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  $4.0t/m^2$ 까지는 매우 심하게 나타나고 있

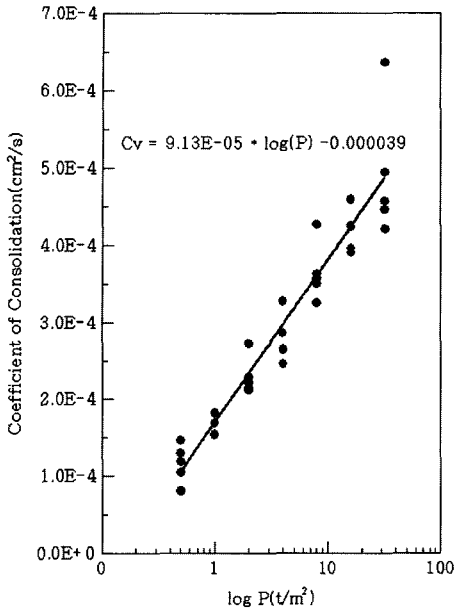


Fig. 8. Average coefficient of consolidation with load increase.

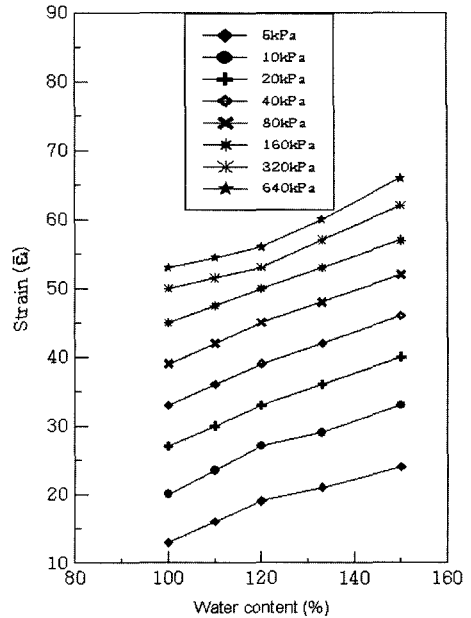


Fig. 10. Strain of dredged soil with variation of water content.

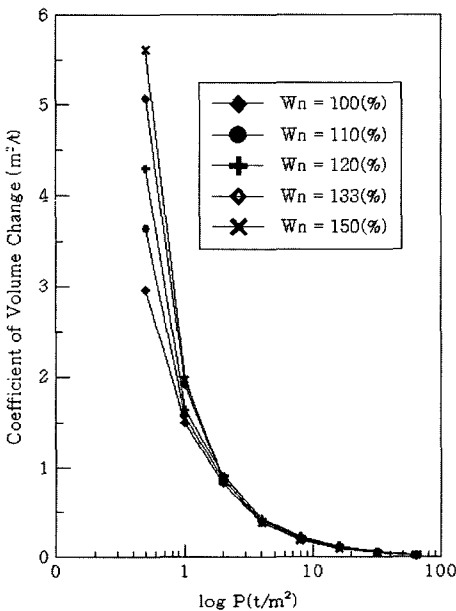


Fig. 9. Coefficient of volume change by load increase.

으며, 그 이후의 하중단계에서는 완만한 변화양상을 나타내고 있다.

미소변형이론에서와는 달리 대변형을 전제로한 Mikasa 이론에서 공칭변형률( $\bar{\epsilon}_r$ )은 1차압밀침하량과 압밀시간을 결정하는 시간계수( $T_v$ )를 결정하는데 있어서 큰 영향을 미

친다. Fig. 10은 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  $8t/m^2$ 에서 준설점토의 1차압밀 완료시점에서의 누적변형률은 39.54%를 나타내고 있으나, 초기함수비 150%의 준설점토의 경우 최종변형률이 52.54%로서 변형이 크게 발생함을 알 수 있다.

하중단계  $0.5 \sim 64.0t/m^2$ 에 대하여 각 하중단계별 준설점토의 함수비와 변형률의 관계를 다음 Table 4에 나타내었으며 함수비변화에 따른 5종의 준설점토에 대한 회귀분석결과로부터  $\bar{\epsilon}_r$ 의 산정식을 제안하였다. 다양한 토성에 대한 실험과 많은 데이터가 확보되지 못한 아쉬운 점이 있지만 본 연구에서 사용된 재료와 유사한 준설지반에서 Mikasa 이론에 의한 시간계수 산정이나 변형률에 의한 압밀침하량 산정시 대단히 유용한 자료로 이용될 수 있을 것이라고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 고함수비를 갖는 준설점토의 압밀특성을 규명하기 위하여 재성형된 준설점토와 함수비가 100%,

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

$P(t/m^2)$	$\bar{\epsilon}_f(\%)$
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	$26w_n + 25.77$

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. 본 연구에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 고함수비 지반에서의  $e$ -log  $P$ 곡선의 형상은 약간 오목한 형으로 초기함수비가 높을수록 비선형적 거동양상이 더욱 뚜렷하였으며, 하중단계  $0.0\sim 4.0t/m^2$ 까지는 함수비의 증가에 따라 기울기의 변화가 현저하였고, 그 이후의 하중단계에서는 초기함수비에 관계없이 거의 유사한 압축지수값을 나타내고 있었다.

(2) 준설점토의 2차압축지수는 초기함수비변화에 관계없이 준설토 고유의 값이 존재함을 알 수 있었고, 준설토의 압축지수비( $c'_\alpha$ )는 초기함수비가 높을수록 감소하는 경향을 보였는데 이는 함수비가 증가할수록 2차압축지수는 함수비에 영향을 받고 있지 않지만 압축지수값이 함수비가 증가함에 따라 더욱 더 큰 값이 나타나기 때문에 판단된다. 또한 준설토의 압축지수비는 Mesri가 제안한 값과 유사하게 나타났다.

(3) 준설토의 연직압밀계수는 하중 증가에 따라 계속 증가하는 경향을 보였으나, 하중단계  $64.0t/m^2$ 에서 갑자기 감소하였다. 이는 압밀계수가 압밀소요시간을 결정하는 계

수로서 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 있었고, 압밀하중과 압밀계수, 압밀하중과 변형률의 관계식을 제안하였다.

## 참고문헌

- 김규선, 임형덕, 이우진 (1999). 실내압밀시험에 의한 남해안 해성점토의  $C_a/C_c$ . 한국지반공학회는문집, 15(6), 87~98.
- 유남재, 이명욱, 이종성 (1995). 유한변형을 압밀이론에 의한 연약점토의 지중압밀 침하산정. 대한토목학 회논문집, 18(3), 77~88.
- Crawford, C. B. (1964). Interpretation of the consolidation tests, Soil Mech. Found. Div., ASCE., 90, 93-108.
- Hansbo, S. (1988). Pore pressure dissipation ratio for a non-linear consolidation problem. Discussion, Soil and Foundations, JSSMFE, 28(1), 133-134.
- Leonards, G. A. and Raniah, B. K. (1960). Time effects in the consolidation of clays. ASTM, Special Technical Publication, 254, 116-130.
- Mesri, G. and Castro, A. (1987). The  $C_a/C_c$  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.
- 三笠正人 (1963). 軟弱粘土の 壓密. 東京, 麗島出版會.

Received September 17, 2004

Accepted January 26, 2005