

Rowe Cell을 이용한 슬러리점토의 압밀특성 Consolidation characteristics of slurry by Rowe Cell

정규향¹⁾, Gyu-Hyang Cheong, 조진구²⁾, Jin-Goo Cho, 주재우³⁾, Jae-Woo Ju, 백원진⁴⁾, Won-Jin Baek

¹⁾ 전남대학교 대학원 농공학과 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Agricultural Eng., Chonnam Univ.

²⁾ 전남대학교 농과대학 생물산업공학과 교수, Professor, Dept. of Agricultural Eng., Chonnam Univ.

³⁾ 순천대학교 공과대학 토목환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Suncheon Univ.

⁴⁾ 히로시마대학교 공학연구과 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Social and Environmental Eng., Hiroshima Univ.

SYNOPSIS : Slurry clay has much higher water content than liquid limit of clay and even if small loads apply, it suffers a great settlement. Accordingly it is very difficult to perform a general consolidation test about slurry clay because of high water content. In this study consolidation tests have been performed successfully using Rowe Cell Tester about 1 remolding clay and 3 slurry clays with a water content of 100%, 133% and 150%. From the test results compression index characteristics, secondary compression index characteristics and consolidation coefficient characteristics have been investigated about slurry clay and remolding clay. Also two kinds of theory, by Terzaghi theory and by Mikasa theory, has been used to calculate consolidation coefficients. Compared to the calculation results, they had a similar value of consolidation coefficient. However if Mikasa theory is applied in the field design, the period which reach to the required consolidation degree will be much reduced compared to the period by Terzaghi theory because the time coefficient T_v by Mikasa theory is far smaller than T_v by Terzaghi theory.

주요어(Key words) : Slurry, Coefficient of consolidation, ratio of compression index

1. 서 론

국내의 간척공사에 있어서 준설매립재료로 해성점토가 많이 이용되고 있다. 이러한 해성점토는 준설 투기시 고함수비 상태로 배사관을 통해 가토제 내에 투기되어 초기에는 고함수비 상태로 존재하지만 건조수축과정을 거쳐 상부에 고결층을 형성하게 된다. 그러나, 하부는 여전히 고함수비 상태로 존재하게 되며, 이러한 초연약점토위에 지반개량을 위한 복토를 하는 경우, 그렇게 크지 않는 상재하중이 가해지더라도 전체 두께의 1/3~1/2정도나 되는 압밀침하가 발생하는 경우가 많다. 이러한 준설매립된 슬러리상태의 초연약점토는 함수비가 매우 커서 성형이 어렵기 때문에 보통의 압밀시험으로는 시험이 불가능하다. 그러나, 지반개량 설계를 위해서는 이러한 초연약점토, 즉 준설슬러리의 압밀정수들을 산정할 필요가 있는데, 본 연구에서는 Rowe Cell 압밀시험기를 사용하여 다양한 함수비 즉 100%, 133%, 150%의 함수비를 갖는 슬러리지반에 대한 압밀시험을 행하는데 성공하였다. 또한 비교를 위해 선행하중 50kpa로서 재성형된 점토에 대한 압밀시험도 행하였다. 슬러리지반은 일반 점토지반에 비해 침하량이 매우 큰 특징이 있어서, 특히 압밀해석에 있어서 테르자기 압밀방정식을 이용하는 데는 모순이 존재한다. 즉 슬러리지반의 경우 압밀도중에 투수계수, 체적압축계수, 압밀계수가 변한다고 볼 수 있으

며 압밀량이 매우 커서 압밀계산에서 압밀층의 두께의 변화도 중요한 인자이다. 이러한 점을 고려하여 Mikasa는 압밀이 초과간극수압소산이라는 개념에서 벗어나 압축변형율의 변화라는 개념을 가지고 새로운 방정식을 제안하였다. 본 연구에서는 Mikasa가 제안한 이론들 중 일부를 검토하였으며, Rowe Cell을 이용한 슬러리 점토에 대한 시험결과를 Terzaghi 및 Mikasa의 이론을 사용하여 압밀계수를 구하였다. 또한, 고풀수비를 갖는 슬러리점토지반의 압축지수특성, 2 차압밀특성등을 비교검토하였다.

2. Mikasa가 제안한 압밀방정식

Terzaghi의 압밀방정식은 다음식과 같다.

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

즉 압밀이란 외부 압밀하중에 의해 발생한 초과 간극수압이 시간이 지남에 따라 소산되면서 침하하는 현상이라 하였다. 그러나, 압밀도중 투수계수, 체적변화계수, 압밀계수등의 변화가 무시되는 약점을 지닌다. 따라서, Mikasa는 압밀도중 투수계수, 체적변화계수는 변하며 압밀계수가 일정하다고 가정하는 경우에 대해 다음과 같은 식을 제안하였다.

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

여기서, ϵ 는 압축변형율, c_v 는 압밀계수를 나타낸다.

또한, Mikasa는 압밀계수가 일정할 때, 투수계수 및 체적변화계수의 변화 그리고 압밀침하에 의한 층두께의 변화를 고려하면서 압밀방정식으로서 다음식을 제안하였다.

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

여기서, 압밀비 $\zeta = \frac{(\delta z)_0}{\delta z}$

$(\delta z)_0$: 점토요소의 처음 두께

δz : 고려되고 있는 층의 두께

그리고, Mikasa는 압밀계수가 변하는 경우, 그리고 자중에 의한 압밀을 고려하는 경우등으로 본인이 제안한 압밀이론을 확장해 나간다. 본 연구에서는 (2)식을 풀어서 압밀해석에 이용하는 즉 본 방법에 의해 압밀계수를 산정하여 테르자기가 제안한 방법에 의한 값과 비교를 행하고자 하였다. 먼저, 압밀도에 따르는 시간계수를 구하는 식을 나타내면 다음과 같다.

$$T_K = \frac{c_v t_K}{H^2} \quad (4)$$

즉 (4)식은 K%압밀에 도달하는 시간계수를 구하는 식이다. 즉 현장에서 채취한 시료에 대해 실내 압밀 시험을 실시하여, 윗식을 이용하여 압밀계수를 구한다. 또한 현장의 설계에 적용할 때는 (4)식을 이용하여 소정의 압밀도에 도달하는데 걸리는 시간을 구하게 된다. Terzaghi가 제안한 (1)식을 이용하여 압밀해석을 하는 경우에는 압밀도에 따른 시간계수가 일정한 값을 갖는다. 즉 90%압밀에 달하는 시간계

수는 0.848이다. 그러나, Mikasa가 제안한 (3)식을 풀게 되면, 최종변형율 ϵ_f 의 크기에 따라서 시간계수는 각각 다르다. 식(3)으로 부터 시간계수를 결정하기 위해서 차분방정식을 이용하는데 그 과정은 다음과 같다.

$$\Delta \zeta_{z_0} = n^2 \cdot \Delta T \cdot \zeta_{z_0}^2 \cdot \frac{1}{4} (\zeta_{z_0 + \Delta z_0} - 2\zeta_{z_0} + \zeta_{z_0 - \Delta z_0}) \quad (5)$$

여기서, $\Delta z_0 : H_0/n$

$H_0 : \text{초기상태에서의 점토층의 전체두께}$

$n : \text{점토층의 분할 간격}$

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

$$U_{z_0} = \frac{\bar{\epsilon}}{\epsilon_f} \quad (6)$$

아래 그림1 과 그림2는 식(3)을 유한차분법으로 풀어 나타낸 결과이다. 즉 그림 1은 $\bar{\epsilon}_f = 0.2$ 에서 압밀도에 따른 시간계수곡선을 나타낸 것이며 그림2 는 최종변형율 $\bar{\epsilon}_f$ 의 크기가 0.1 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로 바뀔 때 압밀도에 다른 시간계수를 보여주고 있다.

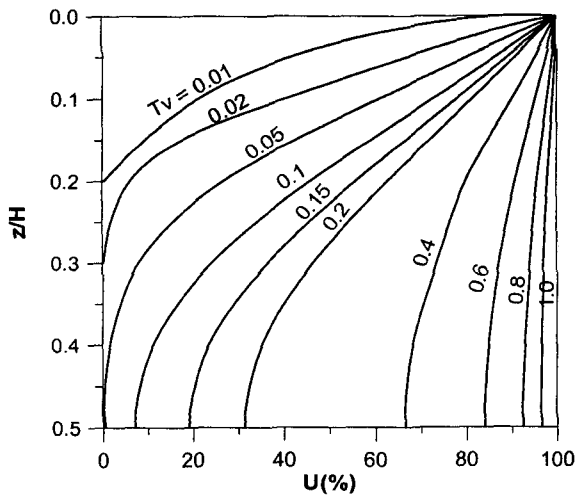


그림 1. $\bar{\epsilon}_f = 0.2$ 에서 등시곡선

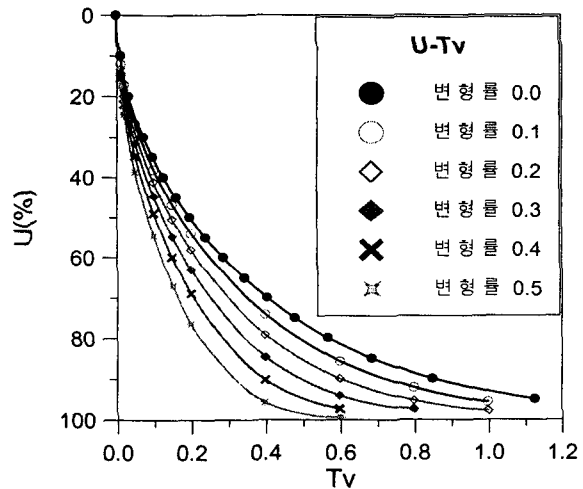


그림 2. 변형률에 따른 $U - Tv$

즉 Mikasa가 제안한 압밀방정식을 이용하기 위해서는 최종변형율의 결정이 중요하다. 즉 최종변형율 $\bar{\epsilon}_f$ 를 결정하므로써 그에 따라, 압밀도에 따른 시간계수를 결정하게 된다. 따라서, Mikasa의 압밀식에서는 최종변형율 $\bar{\epsilon}_f$ 가 달라지면 시간계수는 달라진다.

3 슬러리점토의 압밀시험

3.1 시료조제

본 연구에 사용된 시료는 서남해안 점토를 사용하였으며 표층으로부터 1m 이하에서 Slurry상태로 시료를 채취하였다. 완전포화된 공시체를 조제하기 위해 현장상태 함수비에서 적절한 증류수의 양을 첨가해 함수비가 액성한계의 두배 이상인 100%, 133%, 150%로 조제한 후 밀폐된 용기내에 48시간 이상을 방치한 후, Rowe Cell 용기에 시료를 정치하였다. 시험에 사용된 시료의 기본 물성값은 비중 2.69, 액성한계 50%, 소성지수 20으로서 통일분류법상 CH에 해당된다. 시료의 초기평균포화도는 96%였으며, 초기 시료의 높이는 5.29cm, 직경은 15.1cm의 크기를 갖는다.

3.2 하중재하

재하하중은 슬러리지반이 작은 하중하에서도 침하량이 크기 때문에 5kpa라는 작은 하중에서 부터 압밀을 시작하였으며 최대 640Kpa까지 재하하였다. 재성형모울드를 사용하여 선행하중 50kpa를 주어 한달간 압밀을 시켜서 만든 재성형점토의 경우 역시 똑같은 단계의 하중을 재하하였다. 하중재하장치는 ELE사에서 제작된 Oil-Water System을 사용하였다. 이 하중재하장치는 임의의 하중을 일정하게 재하할 수 있으며 하중재하 범위는 0~3000Kpa 까지 재하할 수 있다. 하중재하방법은 슬러리 및 재성형 점토에서 표준압밀 시험과 동일($\frac{\Delta p}{p} = 1$)하게 재하하였다. 슬러리 시험시 5Kpa에 대한 하중재하 시간은 2차압밀까지 관측할 수 있도록 96시간을 재하하였으며, 10Kpa 이상은 48시간을 재하하였다. 또한 재성형점토의 하중재하시간은 표준압밀시험과 동일하게 24시간씩으로 하였다.

3.3 압밀정수

Rowe Cell 압밀시험에 의한 연직압밀계수, 압축지수비 및 2차압축지수를 산정하였다. 압축지수는 식(7)로 산정하였으며 또한 2차압축지수는 식(8)에 의해 산정하였다.

$$c_c = \frac{e_0 - e}{\log p_2 - \log p_1} \quad (7)$$

여기서, c_c : 압축지수

e_0 : 초기간극비

e : 임의하중에서 간극비

p_1, p_2 : 간극비 e_0 및 e 에서의 하중

$$c_a = \frac{e_1 - e_2}{\log t_2 - \log t_1} \quad (8)$$

여기서, c_a : 2차압축지수

e_1, e_2 : 간극비

t_1, t_2 : e_1, e_2 에서의 시간

Masri 와 Castro(1987)은 여러종류의 흙에 대해서 c_a/c_c 가 0.02~0.1의 값을 가진다고 하였고, 무기질점토에 대해 $c_a/c_c = 0.04 \pm 0.01$, 유기질점토에 대해서 $c_a/c_c = 0.05 \pm 0.01$ 의 범위에서 존재한다고 제안하였다.

4. 압밀시험결과 및 고찰

4.1 슬러리점토의 함수비-압축지수의 관계

슬러리 점토는 대부분 함수비가 높으며, 기존의 시험방법으로는 압밀시험이 불가능하다. 따라서, 지금까지는 정확한 데이터에 의한 설계는 어려운 실정이었다. 본 연구에서는 Rowe Cell 실험방법을 이용함으로써 슬러리점토에 대한 압밀시험을 성공적으로 수행하게 되었다. 표 1은 각각의 함수비에 대한 시험결과로부터 얻은 초기높이, 초기간극비, 압축지수, 2차압축지수 및 압축지수비를 나타낸 것이다. 그림 3은 슬러리점토 및 재성형점토의 하중의 증가에 따른 간극비의 변화를 나타낸 것이다. 재성형점토의 경우, 약 50kpa의 선행하중을 가지며 선행하중 이상의 하중에서는 직선적인 관계를 보인다. 이는 일반점토의 전형적인 모습이다. 그러나, 슬러리점토의 경우는 초기부터 직선적으로 변하고 있어서 선행하중이 나타나지 않는다. 슬러리점토의 압축지수는 함수비 100%,133%,150%의 경우 각각 0.65, 0.74, 0.78로서 매우 큰 값을 갖는데 함수비가 증가할수록 약간씩 큰 값을 갖는 경향을 보이지만, 큰 차이는 보이지 않는 특성을 지닌다. 재성형점토의 경우 선행하중이상의 하중에서의 압축지수는 0.58인데 역시 슬러리 점토보다는 작은 값을 가지나 그 값에 큰 차이를 보이지는 않고 있다. 초기함수비 증가에 따른 압축지수 변화를 그림4에 나타냈으며 회귀분석한 결과는 다음식과 같다.

$$c_c = 0.0026w_n + 0.39 \quad (9)$$

여기서, w_n : 초기함수비

표1. 슬러리점토 및 재성형점토의 압밀시험결과

No.	함수비 (%)	초기높이 (cm)	초기간극비 (e_0)	압축지수 (c_c)	2차 압축지수 (c_a)	압축지수비 (c_a')
slurry-1	100	5.41	2.92	0.65	0.038	0.0582
slurry-2	133	5.12	3.72	0.74	0.038	0.0483
slurry-3	150	5.34	4.23	0.78	0.041	0.0427
remolding	56	3	1.71	0.58		

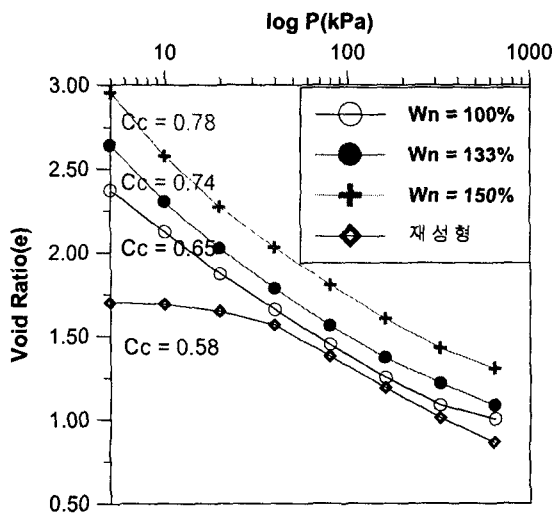


그림 3. 함수비에 따른 e-logP 곡선

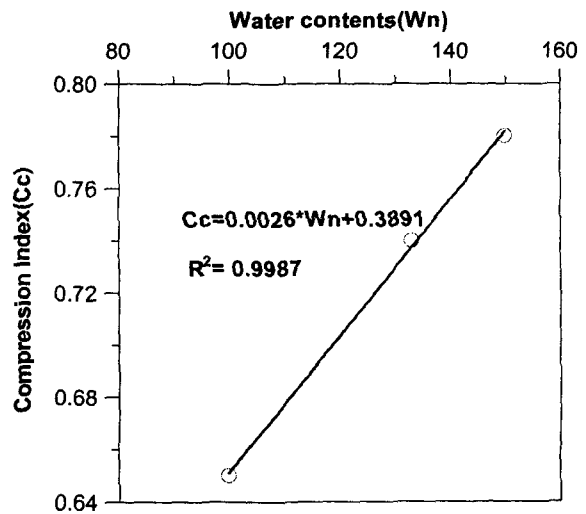


그림 4. 함수비변화에 따른 압축지수

4.2 슬러리점토의 2차압축지수

그림5, 그림6은 함수비 100%, 133%, 150%인 슬러리점토에 대해, 하중 5kPa, 40kPa일 경우 e-logt곡선을 나타낸 것이다. 슬러리 점토의 경우에도 2차압밀로 진행되는 부분에서 바뀌는 일반점토에서처럼 S자 형상을 보여주고 있다. 2차 압축지수는 0.038, 0.038, 0.041로서 함수비의 변화에 영향을 받지 않음을 알 수가 있다. 압축지수비(c_a')는 0.0497로 Mesri가 제안한 무기질점토의 압축지수비 $c_a' = 0.04 \pm 0.01$ 와 유사한 결과가 나타났으며 따라서 슬러리점토의 2차압축특성은 일반점토와 유사하다고 판단된다.

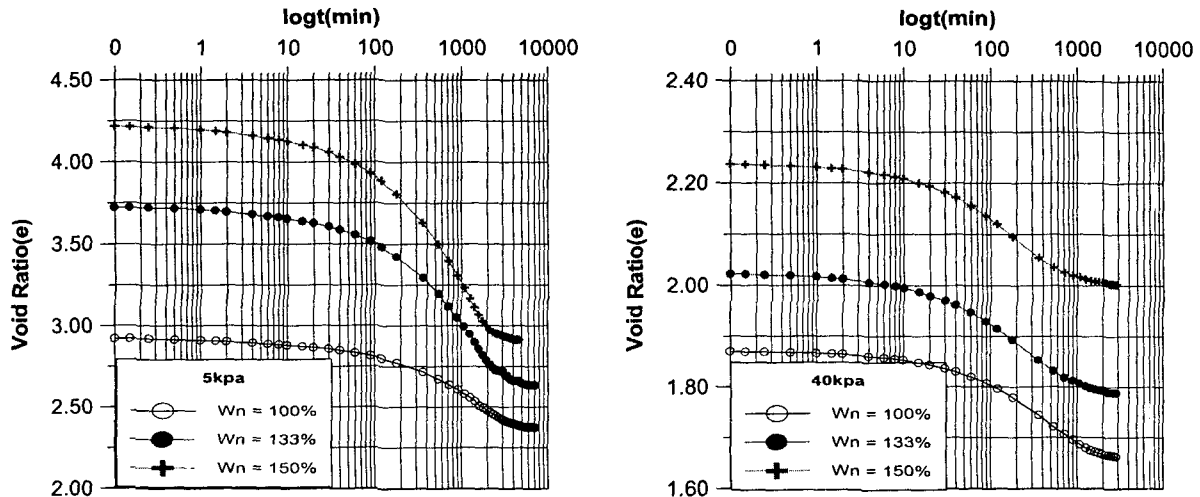
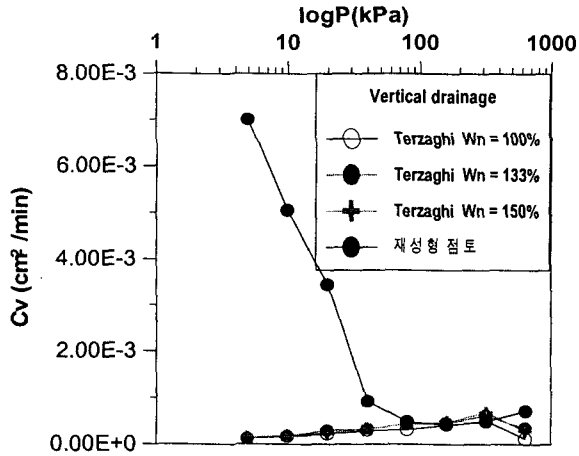


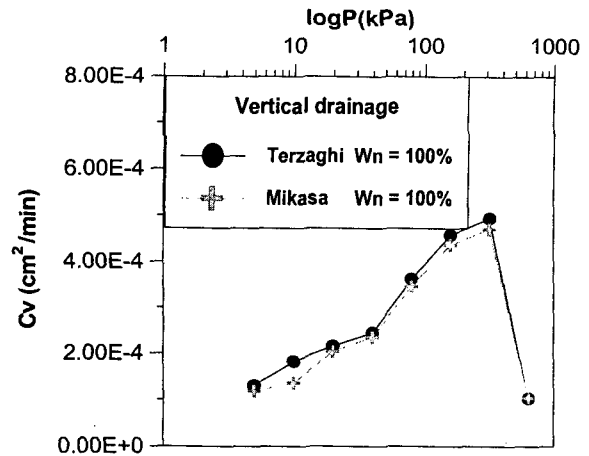
그림 5. 함수비변화에 따른 e-logt 곡선

4.3 슬러리 점토의 압밀계수

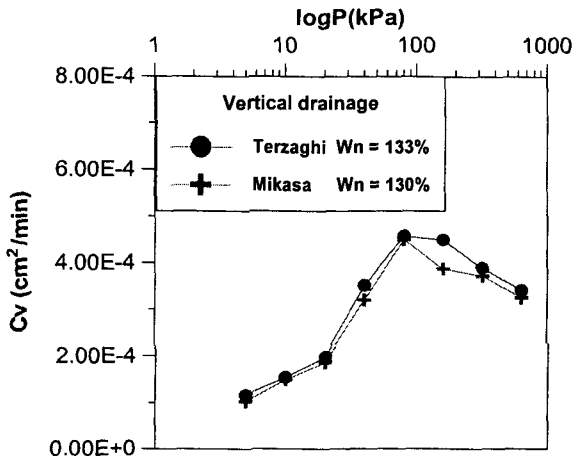
슬러리 점토의 압밀계수는 두가지 방법으로 행하여 졌다. 첫째는 기존의 테르자기 압밀이론에 의해 구하는 방법 둘째는 Mikasa의 이론중에서 압밀계수는 일정이라 가정하며, 투수계수, 체적압축계수, 층 두께가 변한다는 가정하에 제안된 식(3)을 이용하여 구하는 방법이다. 그림6(a)는 테르자기이론에 의해 초기함수비 100%,133%,150% 및 재성형점토에 대한 압밀계수를 나타낸 것이다. 재성형점토의 경우는 선행하중 이전에는 큰 값을 보이고 있으나, 그 이후는 압밀하중의 증가에도 불구하고 유사한 값을 보이고 있다. 슬러리점토의 경우 압밀하중 320kpa까지 점차 증가하다가 그 이후 감소하지만 그 차는 그렇게 크지 않는 경향을 나타내었다. 그림6 (b)(c)(d)는 초기함수비가 100%, 133%, 150%인 경우 테르자기이론과 Mikasa이론에 의한 압밀계수를 비교한 것이다. 두 가지 이론에 의해 구한 압밀계수는 서로 유사한 값을 가지는데 자세히 살펴보면 Mikasa이론에 의한 값이 약간 작은 경향을 보인다. 그러나, Mikasa이론의 경우 최종변형율을 고려하여 시간계수 $T_K = \frac{c_v t_K}{H^2}$ 를 구하기 때문에 그 값은 테르자기 이론에 의한 값은 90%압밀도에 따르는 시간계수는 0.848이다. 그러나 Mikasa이론에 의해 최종 변형율을 0.25로 가정한 경우 90%압밀도 따른 시간계수는 0.46이 된다. 따라서, Mikasa이론을 적용한다면 실제 현장설계시 소정의 압밀도에 달하는데 소요되는 기간은 훨씬 줄어들 것이다.



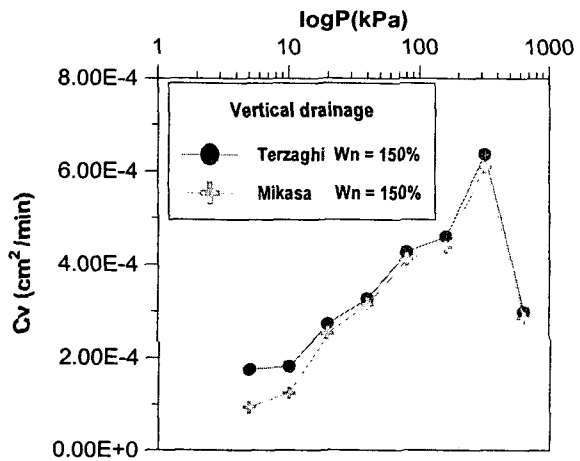
(a)



(b)



(c)

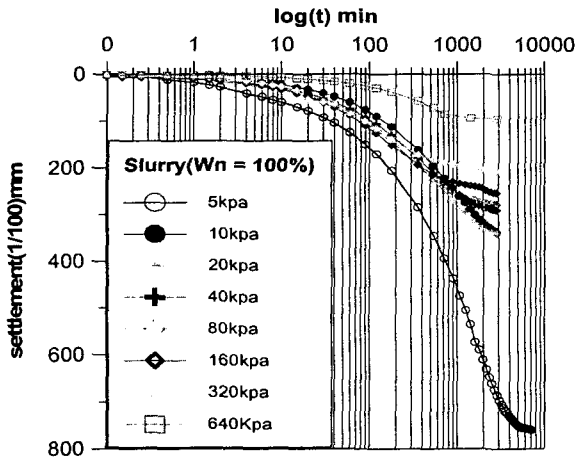


(d)

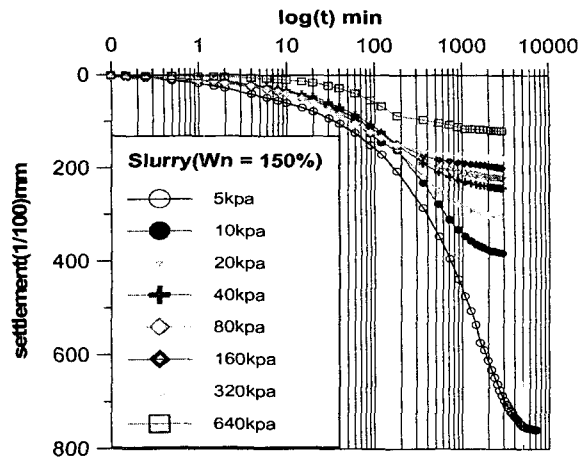
그림 6. Terzaghi 및 Mikasa 이론에 의한 압밀계수의 비교

4.4 변형률

슬러리점토는 압밀이 완료되면 대단히 큰 변형을 겪게 된다. 즉 그림7은 하중증가에 따른 준설점토의 변형률을 나타내고 있는데 그림에서와 같이 5Kpa정도의 아주 작은 하중하에서도 그 변형정도는 전체 변형률의 약 29%~45%를 차지하고 있어 초기 변형이 대단히 크음을 알 수가 있으며 압밀 전과정을 거치면 49%~56%로 큰 침하량을 보여준다. 만약 슬러리점토의 압밀층이 5m라 가정하면, 대단히 작은 하중인 5kpa에서도 초기에 1.45m에서 2.25m정도의 큰 침하가 발생하게 된다. 즉 고풍수비상태의 슬러리점토는 초기간극비가 매우 크기 때문에 적은 하중에서 대변형이 발생한다는 점이 큰 특징이다.



(a) 함수비100%



(b) 함수비 150%

그림 7. 함수비변화에 따른 s-logt 곡선

5. 결론

Rowe Cell을 이용하여 1종의 재성형점토와 함수비가 100%, 133%, 150%로서 매우 큰 3종의 슬러리점토에 대한 압밀시험을 실시하였으며, 실험 결과로부터 압축지수특성, 2차 압축지수특성, 압밀계수 특성등을 분석하였다. 특히 압밀계수 계산에는 테르자기 및 Mikasa이론을 사용하여 계산을 행하였으며 이들 결과를 분석한 내용은 다음과 같다.

1. 압축지수곡선은 슬러리점토의 경우는 초기부터 직선적으로 변하고 있어서 선행하중이 나타나지 않는다. 압축지수는 함수비 100%,133%,150%의 경우 각각 0.65, 0.74, 0.78로서 매우 큰 값을 갖는데 함수비가 증가할수록 약간씩 큰 값을 갖는 경향을 보인다.
2. 2차 압축지수는 0.038, 0.038, 0.041로서 함수비의 변화에 영향을 받고 있지 않음을 알 수가 있다. 압축지수비(c_a')는 0.0497로 Mesri가 제안한 무기질점토의 압축지수비 $c_a' = 0.04 \pm 0.01$ 와 유사한 결과가 나타났으며 따라서 슬러리점토의 2차 압축특성은 일반점토와 유사하다고 판단된다.
3. 대부분의 슬러리점토에서 압밀계수는 압밀하중 320kpa까지 점차 커지다가 작아지는 경향을 보이고 있으며, 일반점토에서처럼 선행하중특성은 보이지 않았다.
4. 슬러리 점토의 경우 함수비변화에 따른 초기하중 5Kpa에서의 침하량은 전체침하량의 29%~45%를 차지하고 있으며 또한 전체변형률은 49%~56%에 달하여 대변형이 발생하고 있음을 알 수 있었다.
5. 테르자기이론과 Mikasa이론에 의한 압밀계수를 비교한 결과 압밀계수는 Mikasa이론에 의한 값이 약간 작은 경향을 보인다. 그러나, Mikasa이론의 경우 최종변형율을 고려하여 시간계수를 구하기 때문에 그 값은 테르자기이론에 의한 값보다 훨씬 작다. 따라서, Mikasa이론이 실제 현장설계시 적용된다면 소정의 압밀도에 달하는데 소요되는 시간은 테르자기이론에 의한 결과에 비해 훨씬 줄어들 것이다

참고문헌

1. Mesri, G. and Castro, A. 1987, " the C_a/C_c Concept and K_0 During Secondary Compression", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 113, No. GT3, pp. 230-247.
2. Asaoka, A., 1978, "Observational Procedure of Settlement Prediction", Soils and Foundations, Vol.18, No.4
3. 김규선, 임형덕, 이우진, 1999, "실내압밀시험에 의한 남해안 해성점토의 C_a/C_c ", 한국지반공학회는 문집, Vol.15, No.6, pp.87~98
4. 三笠正人, 1963, "軟弱粘土의 壓密-新壓密理論과 應用", 미래기술, 서울