

고함수비를 가진 준설토의 압밀특성

Consolidation Characteristics of Dredged Soil with High Water Content

주재우* · 정규향** · 김영규***
Ju, Jae Woo · Cheong, Gyu Hyang · Kim, Young Gyu

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 1 remolding clay of water content 56% and 4 slurry clays of a water content of 100%, 120%, 133% and 150%. From the test results the consolidation characteristics such as compression index, secondary compression index and consolidation coefficient have been investigated with a variation of water content of dredged soil. The equations to get consolidation constants such as a compression index, a consolidation coefficient have been proposed with the field water content.

Keywords : Dredged soil, Rowe cell, Coefficient of consolidation, Compression index

I. 서 론

국내의 간척공사에 있어서 매립토로 준설토가 많이 이용되고 있다. 이러한 준설토는 준설투기시 고함수비 상태로 배사관을 통해 가토제 내에 투기된 후 건조수축과정을 거쳐 상부에 고결층을 형성하게 된다. 그러나, 하부는 여전히 고함수비 상태로 존재

하게 되며, 이러한 초연약준설토 위에 지반개량을 위한 복토를 하는 경우, 적은 상재하중이 가해지더라도 매우 큰 압밀침하가 발생하는 경우가 많다. 따라서 정확한 설계를 하기 위해서는 압밀시험이 필수적이거나 고함수비로 인해 성형이 되지 않는 관계로 이에 대한 연구는 국내외적으로 아주 미흡한 실정에 있다. 본 연구에서는 다양한 고함수비를 갖는 준설토를 제작하였으며, 성형이 되지 않더라도 압밀시험이 가능한 Rowe Cell 시험기를 이용하여 시험을 실시하였다. 또한 비교를 위해 함수비 56%로 재성형된 시료에 대한 Rowe Cell 압밀시험도 병행하였다.

* 순천대학교 토목환경공학부 교수
** 전남대학교 대학원 농공학과 박사수료
*** (주)한국항만기술단 과장
* Corresponding author. Tel.: +82-61-750-3515
fax: +82-61-750-3510
E-mail address: woo3318@hanmai.net

II. Rowe Cell 압밀시험기

Rowe 등(1966)에 의해서 개발된 Rowe Cell 시험기는 시료와 압밀링간의 마찰력을 감소시킬 수 있고, 공극수압을 측정할 수 있으며 또한 함수비가 커서 성형이 안되는 준설토를 실험할 수 있는 장점이 있다. 본 시험기는 0~3,600 kPa의 압밀하중을 가할 수 있는 장치이며 다양한 시험조건을 갖는 수평배수압밀시험 및 연직배수압밀시험이 가능하다.

III. 시료제작 및 실험

1. 준설토

본 연구에 사용된 시료는 서남해안 준설토를 사용하였으며 표층으로부터 1 m 이하에서 Slurry 상태로 시료를 채취하였다. 고함수비를 갖는 시료를 제작하기 위해서 현장상태의 시료에 적절하게 증류수를 첨가하였는데, 제작된 시료는 함수비가 100%, 120%, 133%, 150%로서 액성한계 50%의 2배이상 되는 초연약준설토라 말할 수 있다. 시험에

사용된 시료의 물리적 특성은 Table 1에 나타내었으며, 즉 비중 2.69, 액성한계 50%, 소성지수 20, pH 6.83으로서 흙의 종류는 통일분류법상 CH에 해당되었다. Rowe Cell에 들어가는 시료는 높이 5.29 cm, 직경 15.1 cm로서 상당히 큰 값이다. 재성형준설토의 제작은 Rowe Cell 시험기를 직접 이용하였는데, 즉 초기함수비 100%의 시료를 Rowe Cell에 정치하여 40 kPa의 선행하중을 가한 후 48시간 팽창하였는데 이때의 함수비는 56%였으며, 이후는 재성형하지 않은 준설토와 같은 방법으로 압밀시험이 실시되었다.

Table 1 Physical properties of dredged soil

Ww (%)	100, 120, 133, 150
Gs	2.69
LL (%)	50
PI	20
USCS	CH
P200 (%)	99.8
Organism content (%)	2.35
pH	6.83

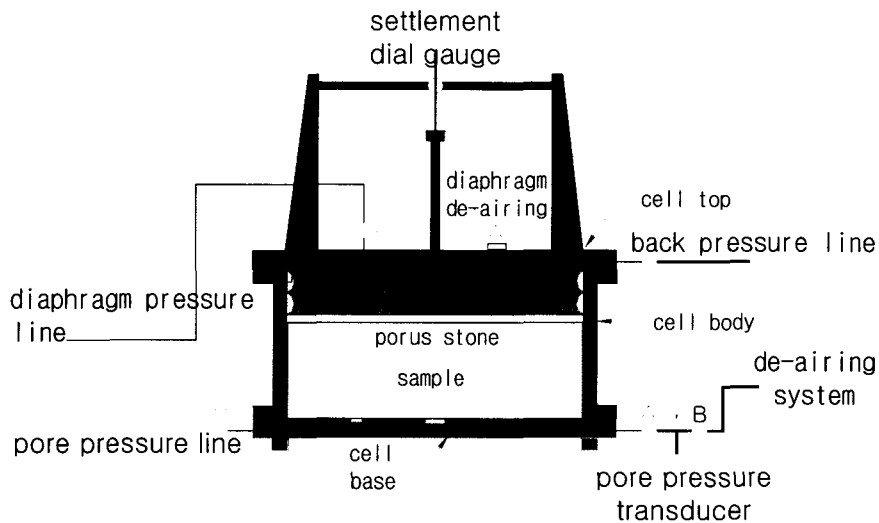


Fig. 1 Rowe Cell consolidation apparatus

2. 압밀시험

5 kPa의 압밀하중에서부터 압밀을 시작하였으며 최대 640 kPa까지 재하하였다. 하중증가율은 표준 압밀시험에서 같이 1을 사용하였다. 고함수비를 갖는 준설토에 대한 시험에서는, 가장 낮은 단계의 하중 5kPa를 재하하였을 경우, 하중재하시간은 96 시간을 재하 하였으며, 10 kPa 이상은 48시간을 재하하여 표준압밀시험에서의 24시간보다 재하시간을 크게 하였다. 그 이유는 낮은 하중단계에서 큰 침하가 일어나는 점을 고려하여, 준설토의 특성을 더욱 자세히 파악하기 위해서이다.

IV. 시험결과 및 고찰

1. 준설토의 압축특성

함수비가 100%에서 150%에 이르는 준설토 및 재생형준설토에 대한 평균압축지수 및 초기공극비를 Table 2에 나타내었으며, 압축지수 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 초기공극비는 함수비가 증가함에 따라 커지는데 함수비 150%에서는 4.23으로서 매우 큰 값을 보이고 있다. 이처럼 함수비가 큰 준설토는 흙입자 사이에 자유수층이 두터워서 보통의 점토와 다른 침하특성을 보이고 있다. 즉 재생형준설토 에서처럼 선행하중이 나타나지 않으며, 초기 낮은 압밀하중에서 큰 침하를 일으킨다. 또한 압축곡선의 형상은 직선적이라기 보다는 약간 오목한 형으로 낮은 압밀하중에서 기울기가 매우 큼을 알 수가 있었다. 평균압축지수는 각각 0.65, 0.70, 0.74, 0.78로서 함수비가 증가함에 따라 커지지만, 그 증가속도가 그다지 크지 않음을 알 수가 있었다. 40 kPa의 압밀하중을 받은 재생형점토는 뚜렷히 선행하중의 영향을 보여주고 있으며, 선행하중 이후의 압축지수는 0.59로서 함수비가 큰 준설토보다는 작아지는 경향을 보였다.

Table 2 Results of consolidation test about very soft and remolded clay

No.	w_w (%)	H_0 (cm)	e_0	c_c
Slurry-1	100	5.41	2.92	0.65
Slurry-2	120	5.31	3.35	0.70
Slurry-3	133	5.12	3.72	0.74
Slurry-4	150	5.34	4.23	0.78
Remolded	56	3.15	1.17	0.59

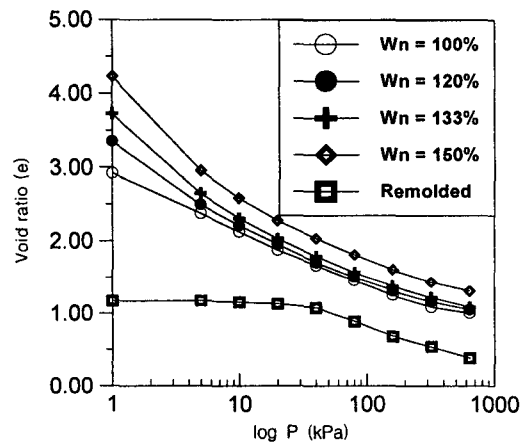


Fig. 2 e-log P curves with water content

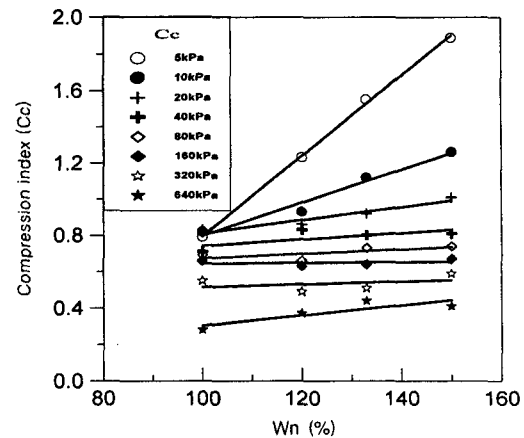


Fig. 3 Compression indexes with change of water content

2. 준설토의 2차 압밀특성

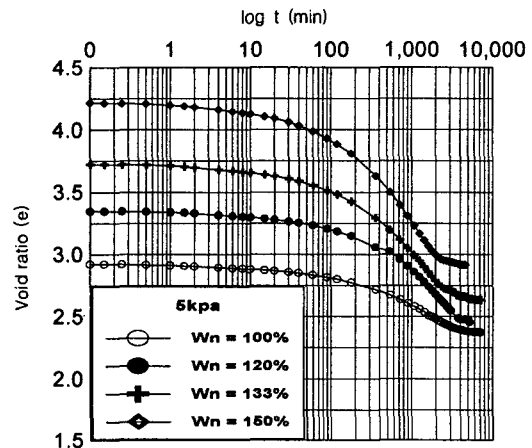
2차 압밀이란 압밀하중의 증가로 인해 발생한 과잉공극수압이 완전히 소산되었음에도, 계속적으로 침하를 일으키는 것을 말한다. 본 연구에서 제작 사용된 함수비가 큰 준설토의 경우 2차 압밀특성이 함수비의 변화에 따라 어떤 경향을 보이는가 하는 것은 흥미로운 일이다. Fig. 4는 함수비 100%, 120%, 133%, 150%인 초연약준설토에 대해, 하중 5 kPa, 10 kPa일 경우 e-log t 곡선을 나타낸 것이다. 고함수비의 준설토의 경우에도 2차압밀로 진행되는 부분에서 바뀌는 일반점토에서처럼 S자 형상을 보여주고 있다. 그리고, 2차 압축지수는 0.038, 0.036, 0.038 0.037로서 함수비의 변화에 영향을 받고 있지 않음을 알 수 있다. 즉 동일한 시료에 함수비만을 가감해서 만든 것이기 때문에, 2차압축특성은 시료자체가 갖는 고유의 값을 의미 하는 것으로 결론지을 수 있다. 본 연구에 사용된 준설토의 압축지수비(c_a')는 0.049로 Mesri 등 (1987)이 제안한 일반점토의 압축지수비 $c_a' = 0.04 \pm 0.01$ 의 평균치보다는 약간 크게 산정 되었다.

3. 준설토의 연직압밀계수

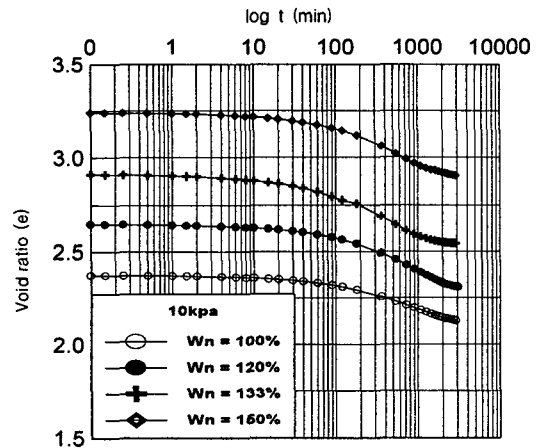
함수비가 큰 준설토는 슬러리상태로 존재하므로 압밀계수에 대한 이방성은 없을 것으로 판단되며, 따라서 수평압밀계수는 연직압밀계수와 유사한 값을 가질 것으로 판단된다. 본 시험에서는 고함수비를 갖는 준설토에 대한 연직압밀시험을 통해 압밀 계수를 산정하였으며, Fig. 5는 초기함수비 100%, 120%, 133%, 150% 및 재성형준설토에 대한 연 직압밀계수를 나타낸 것이다. 함수비가 큰 준설토 의 연직압밀계수가 재성형준설토에 비해 클 것이라 고 판단하였으나, 예상과는 달리 그 반대의 경향을 보여주고 있다. 그리고, 함수비가 증가함에 따라 압

Table 3 The compression indexes

No.	w_w (%)	c_c	c_a	c_a'	Remarks
Slurry-1	100	0.66	0.038	0.058	Average
Slurry-2	120	0.74	0.036	0.052	Average
Slurry-3	133	0.84	0.038	0.048	Average
Slurry-4	150	0.92	0.037	0.042	Average
Remolded	56	0.58	0.02	0.053	Average



(a) 5 kPa



(b) 10 kPa

Fig. 4 The e-log t curves with change of water content

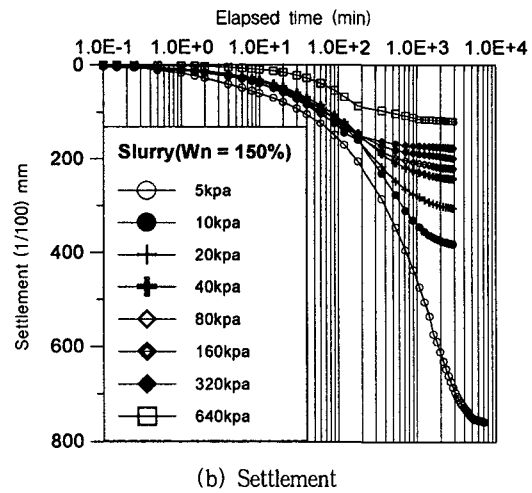
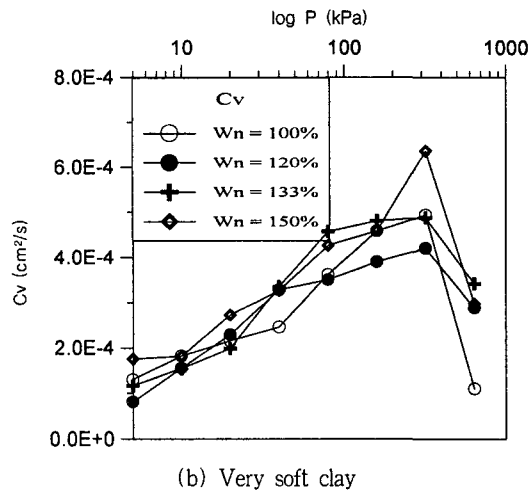
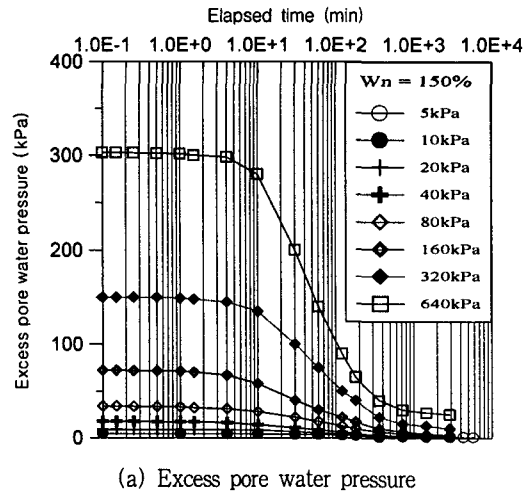
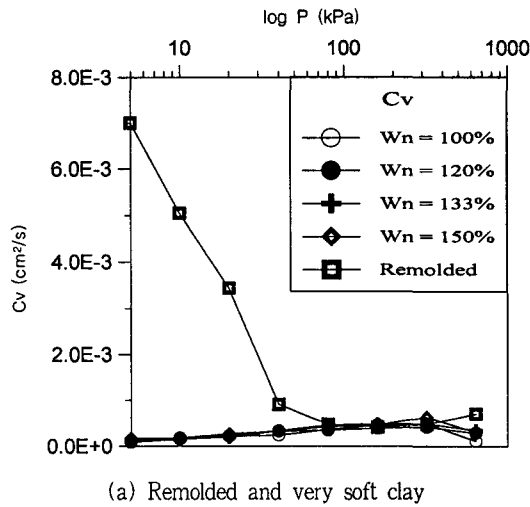


Fig. 5 The Coefficients of consolidation on remolded and soft clay

Fig. 6 Excess pore water pressure and settlement during consolidation

밀계수가 약간씩 증가하지만 그 값은 매우 작아 압밀계수의 증가에는 별다른 영향을 미치지 않음을 알 수가 있다. 오히려 압밀하중의 크기가 연직압밀계수에 영향을 미치고 있다.

4. 준설토에서 발생하는 과잉공극수압 및 변형률

Fig. 6(a)는 함수비 150%에서 시간경과에 따른

과잉공극수압의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이, 압밀하중을 재하한 후 약 10분까지는 과잉공극수압의 소산이 거의 발생하지 않다가 그 이후 빠른 속도로 소산되어지는 성질을 보이고 있다. 보통 일반점토에 대한 연직압밀시험에서는 압밀하중이 그대로 공극수압의 증가로 이어진다. 그러나 본 준설토의 경우는 공극수압의 증가는 압밀하중의 약 80~90% 정도만이 발견되는 특이

한 현상을 보였다. Fig. 6(b)는 하중증가에 따른 준설토의 변형률을 나타내고 있는데 그림에서와 같이 5 kPa정도의 아주 작은 하중하에서도 그 변형 정도는 전체변형률의 약 29~45%를 차지하고 있어 초기 변형이 대단히 큼을 알 수가 있으며 압밀 전과정을 거치면 49~56%로 큰 침하량을 보여준다. 만약 초연약준설토의 압밀층이 5 m라 가정하면, 대단히 작은 하중인 5 kPa에서도 초기에 1.45 m에서 2.25 m 정도의 큰 침하가 발생하게 된다. 즉 고함수비 상태의 준설토는 초기공극비가 매우 크기 때문에 적은 하중에서 대변형이 발생한다는 점이 큰 특징이다.

V. 준설토의 개략적인 압밀정수 결정방법의 제안

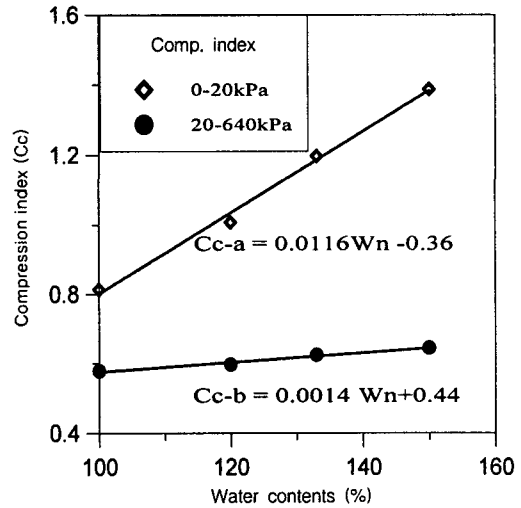
준설토지반을 개량하기 위한 설계를 하기 위해서 필요로 하는 압밀정수는 침하량을 예측하는 압축지수와 침하속도를 결정하는 압밀계수라 말할 수 있다. 준설토의 $e-\log P$ 곡선을 보면 선형하중은 나타나지 않으며 압밀하중의 크기에 따라 압축지수의 변화가 크다. 즉 초기 낮은 압밀하중 즉 약 20 kPa이하에는 압축지수가 크며, 그 이후는 압축지수가 작다. 기존의 방법처럼 전체평균을 압축지수로 하여 실제 설계에 사용할 경우 침하량을 과소평가하게 된다. 따라서, $e-\log P$ 곡선에서 20kPa를 경계로 하여, 좌측곡선의 평균압축지수를 C_{c-a} 라 하고, 우측곡선의 평균압축지수를 C_{c-b} 라 하였으며 이를 Fig. 7(a)에 나타내었으며 Fig 7(b)는 함수비에 따른 압밀계수값을 회귀분석하여 나타낸 것이다.

본 제안식은 준설토의 ageing효과와 선형하중을 고려하지 않았으며, 토질특성에 따라 다양한 실험이 이루어지지 못한 아쉬운 점은 있지만 본 논문에서 적용된 토질특성과 유사한 지반에 대해서 현장함수비가 측정되면 이를 바탕으로 압축지수 및 압밀계수를 산정할 수 있는 다음 식을 제안한다.

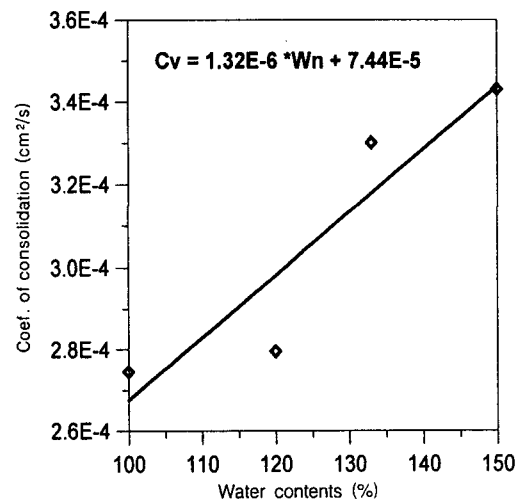
$$C_{c-a} = 0.0116w_n - 0.36 \dots\dots\dots (1)$$

$$C_{c-b} = 0.0014w_n + 0.44 \dots\dots\dots (2)$$

$$C_v = 1.32 \times 10^{-6} w_n + 7.44 \times 10^{-5} \text{ (cm}^2/\text{s)} \dots\dots (3)$$



(a) Compression index



(b) Consolidation coefficient

Fig. 7 Regression analysis of Cc and Cv with change of water contents

VI. 결 론

Rowe Cell을 이용하여 1종의 재성형준설토와 함수비가 100%, 120%, 133%, 150%인 4종의 준설토에 대한 압밀시험을 실시하였으며, 실험 결과로부터 압축지수, 2차 압축지수, 압밀계수 및 변형률 특성 등을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압축곡선의 형상은 직선적이라기 보다는 약간 오목한 형으로 낮은 압밀하중에서 기울기가 매우 큼을 알 수가 있었다. 평균압축지수는 함수비가 증가함에 따라 커지지만, 그 증가속도가 그다지 크지 않음을 알 수가 있었다.

2. 2차 압축지수는 준설토의 함수비의 크기에 영향을 받지 않고 있어, 준설토의 고유값이 존재함을 알 수가 있다.

3. 함수비가 큰 준설토의 연직압밀계수가 재성형 준설토에 비해 클 것이라고 판단하였으나, 예상과는 달리 그 반대의 경향을 보여주고 있다. 그리고, 함수비가 증가함에 따라 압밀계수가 약간씩 증가하지만 그 값은 매우 작아 압밀계수의 증가에는 별다른 영향을 미치지 않음을 알 수가 있다. 오히려 압밀하중의 크기가 연직압밀계수에 영향을 미치고 있다.

4. 압밀하중을 재하한 후 약 10분까지는 과잉공극수압의 소산이 거의 발생하지 않다가 그 이후 빠른속도로 소산되어지는 성질을 보이고 있다. 보통 일반점토에 대한 연직압밀시험에서는 압밀하중이 그대로 간극수압의 증가로 이어진다. 그러나 본 준설토의 경우는 공극수압의 증가는 압밀하중의 약 80~90%정도만이 발현되는 특이한 현상을 보였다. 이는 준설토 내 미립분이 간극수의 흐름을 방해하는 Closing 현상 때문이라고 판단된다.

5. 준설토의 경우 함수비에 따라 전체변형률은 49~56%이고 초기하중 5 kPa에서의 침하량은 전체침하량의 29~45%를 차지하고 있어 초기하중의 영향이 대단히 큰 것으로 나타났다.

6. 현장함수비를 측정함으로써 준설토의 압축지수와 압밀계수를 산정하는 식을 제안하였다.

References

1. Das, B. M., 1999, Principles of Foundation Engineering, PWP Publishing, 4th ed.
2. Marasimha Raju, P. S. R., Pandian, N. S., and Nagaraj, T. S., 1995, Analysis and Estimation of the Coefficient of Consolidation, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2, pp.252-258
3. Duncan, J. M. 1993, Limitations of Conventional Analysis of Consolidation Settlement, *Journal of Geotechnical Eng.*, No.9, pp.1333-1359
4. Hansbo, S., 1988, Pore Pressure Dissipation Ratio for a Nonlinear Consolidation Problem, Discussion, *Soil and Foundations, JSSMFE*, Vol. 28, No. 1, pp.133-134
5. Yoshimi, Y., 1988, Pore Pressure Dissipation Ratio for a Nonlinear Consolidation Problem, Discussion, *Soil and Foundations, JSSMFE*, Vol. 28, No.1, pp.182-184
6. Mesri, G. and Castro, A. 1987, the C_d/C_c Concept and K_0 During Secondary Compression, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. GT3, pp.230-247.
7. Terzaghi, K., and Peck, R. B., 1967, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2d ed., Wiley, New York
8. Rowe, P. W. and Barden, L. 1966, New Consolidation Cell, *Geotechnique*, Vol. 16, pp.162-170
9. Crawford, C. B., 1964, Interpretation of the Consolidation Tests, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, Vol. 90, pp.93-108
10. Leonards, G. A., and Raniah, B. K., 1960, Time Effects in the Consolidation of Clays, *ASTM Special Technical Publication 254*, pp.116-130
11. Skempton, A. W., 1954, The Pore-Pressure Coefficient A and B, *Geotechnique*, Vol. 4, pp.143-147