

남해안 해성점토의 C_a/C_c

C_a/C_c for Marine Clay at Southern Part of Korea

김규선¹⁾, Kyu-Sun Kim, 임형덕²⁾, Hyung-Duk Lim, 이우진³⁾, Woo-Jin Lee

¹⁾ (주)건일엔지니어링 연구원, Researcher, Kunil Engineering Consultant., Co. Ltd.

²⁾ 고려대학교 대학원 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : Consolidation settlements of soft clay are often large and potentially damaging to the structures. Currently, large-scale construction projects for airport and harbor etc. are in progress in Korea and many of these structures will be constructed on thick and soft clay layers. For this kind of ground condition, evaluation of consolidation settlement is required at every design and construction stages, and the magnitude of secondary compression appears to be larger than expected. Generally, the magnitude of secondary compression is evaluated by laboratory and in-situ consolidation tests or by empirical C_a/C_c relationship. The use of empirical value C_a/C_c may be economical, fast and powerful tool in estimating secondary consolidation settlement. However, the databases of the C_a/C_c for typical soft clays in Korea are insufficient. The purpose of this study is to investigate the relationship of C_a/C_c on marine clay near the southern sea in Korea. A series of incremental loading consolidation tests with measurement of pore water pressure were performed. It was found that the C_a/C_c of undisturbed marine clay is 0.0397. This value is similar to that proposed by Mesri and Castro(1987) on inorganic clay and silt.

Key words : End of primary, Secondary compression, Compression index, Incremental loading

1. 서론

최근 국내에서 항만, 공항, 택지, 산업기지 등을 연약지반상에 건설하는 대규모 프로젝트들이 진행 중이다. 이러한 연약지반의 활용이 증가함에 따라 이들 지반의 압밀특성을 정확하게 파악하는 것이 지반의 효율적인 개량을 위해서 매우 중요하다. 특히, 해안 인근의 연약지반에는 상당량의 이차압밀량이 존재하는데, 이러한 이차압밀량을 예측하기 위해 일반적으로 현장 시험이나 실내 시험 결과를 이용한다. 이차압밀은 오랜 기간동안 발생하므로, 이를 현장에서의 실측으로 전체 이차압밀량을 추정하는 방법은 시간적으로나 경제적으로 많은 어려움이 따른다. 그러나, 대상 지반에 대해 기 수행된 압밀시험 결과의 데이터 베이스를 이용한 경험적인 C_a/C_c 를 이용한다면, 간편하게 이차압밀량을 추정할 수 있는 방법이 될 것이고, 이차압밀량 산정에 있어서 경제적 혹은 시간을 절약할 수 있는 강력한 도구가 될 수 있을 것이다. 이를 위해서는 수많은 시험을 통한 데이터 베이스의 구축이 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 남해안 인근의 해성 퇴적층에서 채취된 불교란 시료에 대해 바닥면의 간극수압을 측정하는 단계재하 압밀시험(IL_{EOP})을 실시하였다. 각 압밀하중 단계별로 이차압축지수(C_a)와 압축지수(C_c)를 산정하고, 압밀압력에 따른 각각의 지수의 거동을 비교하였으며, 이로부터, 두 압축지수간의 선형관계를 평가하였다. 또한, 기존의 외국에서 연구된 압밀시험 결과로부터 정리된 C_a/C_c 의 결과를 정리하여, 본 연구에서 제시한 국내 남해안 지반의 C_a/C_c 와 비교하였다.

2. 기존의 연구

이차압밀은 일반적으로 과잉간극수압의 대부분이 소산된 후 발생하는 체적의 변화로 정의된다. 그러나, 이러한 이차압밀의 발생하는 시점에 대한 논의는 Terzaghi가 압밀이론을 발표한 후 70여년 이상 지난 지금까지 논란이 되고 있는 주제이기도 하다. Jamiolkowski 등(1985)은 과잉간극수압의 소산 이후, 즉 일차압밀종료시점(EOP) 이후에 이차압밀이 발생한다고 주장하는 Hypothesis A를, Leroueil 등(1985), Kabbaj 등(1988)은 과잉간극수압의 소산이 발생하는 동시에 이차압밀이 유발된다고 하는 Hypothesis B를 지지하고 있으며, 이는 지금까지도 결론을 내지 못하며 계속 연구중인 과제이기도 하다.

2.1 이차압밀침하

흙의 압축은 간극비의 변화로 표현되며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_0 \quad (1)$$

상재하중이나 유효응력의 변화로 인해 발생한 간극수압이 시간이 경과하면서 완전히 소산되면 이차압밀이 주로 발생하게 된다. 간극수압의 변화없이 침하가 계속되는 이차압밀에서 시간에 따른 간극비나 체적변형의 비를 이차압축지수 ($C_a = \Delta e / \Delta \log t$)로 정의한다. 이 값이 주어진 하중단계에서 일정한 값을 가진다고 가정하면 (Mesri와 Godlewski, 1977), 이차압밀침하량은 시간-침하량 곡선의 관계로부터 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$s_s = \frac{C_a}{1 + e_0} H_0 \log \frac{t_f}{t_p} \quad (2)$$

여기서, H_0 는 압축되는 지반의 두께이고, t_p 는 일차압밀이 종료되는 시점이며, t_f 는 이차압밀침하를 추정하고자 하는 대상 시간이다.

2.2 C_a/C_c 개념

C_a/C_c 개념은 특정 지반의 일정한 C_a/C_c 와 EOP $e-\log p'$ 곡선으로 이차압밀 거동을 정의한 것으로, 이는 압밀시험으로부터 이차압밀량 산정과 데이터 해석에 유용한 역할을 한다. C_a 는 일차압밀단계에 독립적이므로, 실험실에서의 결과를 현장에 직접적인 적용이 가능하다. 지반의 종류에 따라 특성의 선형 관계를 가지므로, 어떠한 최종 하중에서든지 EOP 압밀곡선의 모양으로부터 C_a 의 거동을 예측할 수 있다.

Mesri와 Godlewski(1977)은 C_a 와 C_c 사이의 관계에 대한 연구를 통하여, 일차압밀과 이차압밀은 동일한 메커니즘에 기인한다고 결론지었다. 연구결과에 의하면 하중단계별로 C_a 와 C_c 의 변화양상이 비슷하며 C_a/C_c 가 주어진 지반에 대해 일정한 상수값을 보인다고 한다. 이러한 관찰을 통하여 C_a/C_c 의 개념이 제안되었으며, 특정한 흙에 대하여 시간, 유효응력, 초기간극비에 관계없이 C_a/C_c 의 비는 일정하다고 결론지었다. Mesri와 Castro(1987)는 여러 종류의 흙에 대해서 C_a/C_c 가 0.02~0.1의 값을 가진다고 하였다. 무기질 점토에 대해 $C_a/C_c=0.04 \pm 0.01$, 유기질 점토에 대해서 $C_a/C_c=0.05 \pm 0.01$ 의 범위에 존재한다고 발표하였다.

초기의 이차압밀에 해당하는 C_a 는 EOP $e-\log p'$ 곡선에서의 C_c 와 C_a/C_c 로부터 추정 가능하다. 식 (3)에 의해서, 최종 압밀압력에 의존하는 이차압밀량을 C_c 의 값을 이용하여 추정할 수 있다.

$$s_s = \frac{C_a/C_c \times C_c}{1 + e_0} H_0 \log \frac{t}{t_p} \quad (3)$$

표 1은 여러 연구 결과로부터 흙의 종류에 따른 개략적인 C_a/C_c 의 범위를 정리한 것이다.

표 1. 기존의 연구에 의한 C_a/C_c 의 범위

Soil	C_a/C_c	Reference
Whangamarino clay	0.03~0.04	Newland and Alley (1960)
Norfolk organic silt	0.05	Barber (1961)
Calcareous organic silt	0.035~0.06	Wahls (1962)
Amorphous and fibrous peat	0.035~0.083	Lea and Brawner (1963)
Canadian muskeg	0.09~0.10	Adams (1965)
Leda clay	0.03~0.055	Walker and Raymond (1968)
Leda clay	0.04~0.06	Walker and Raymond (1969)
Peat	0.075~0.085	Weber (1969)
Post-gracial organic clay	0.05~0.07	Chang (1969)
Soft blue clay	0.026	Crawford and Sutherland (1971)
Organic clays and silts	0.04~0.06	Ladd (1971)
Sensitive clay, Portland	0.025~0.055	Ladd (1971)
Peat	0.05~0.08	Samson and La Rochelle (1972)
San Francisco Bay mud	0.04~0.06	Su and Prysock (1972)
New Liskeard varved clay	0.03~0.06	Quigley and Ogunbadejo (1972)
Silty clay	0.032	Samson and Garneau (1973)
Nearshore clays and silts	0.055~0.075	Brown and Rashid (1975)
Fibrous peat	0.06~0.085	Berry and Vickers (1975)
Mexico City clay	0.03~0.035	Mesri <i>et al.</i> (1975)
Leda clay	0.025~0.04	Mesri and Godlewski (1977)
New Haven organic clay silt	0.04~0.075	Mesri and Godlewski (1977)
Berthierville clay	0.045	Mesri and Castro (1987)
Tar sand	0.035	Mesri and Castro (1987)
Bearpaw shale	0.029	Mesri and Castro (1987)
Batiscan clay	0.030	Feng (1991)
St.-Hilaire clay	0.029	Feng (1991)
Vasby clay	0.044~0.055	Feng (1991)
Peat	0.00034~0.11	Fox <i>et al.</i> (1992)
Kumamoto and Isogo clay	0.048	Katagiri (1993)
Sabkha soil	0.037	Al-Shamrani (1997)

3. 시료준비 및 압밀시험

3.1 시료준비

본 시험에 사용된 시료는 남해안 인근의 해성 퇴적층의 9~16m 지점에서 100mm 피스톤 샘플러로 채취되었으며, 압밀시험을 위한 시료 추출시, 시료통 벽면 마찰로 인한 교란을 막기 위해 커팅 방법을 사용하였다. 불교란 시료는 양 끝단을 파라핀으로 봉하여 보관 기간동안 수분 증발을 억제하고, 실험 기간 동안 자연상태의 위치를 유지하기 위해서 연직 보관하였으며, 매 실험 때마다 시료통을 커팅하여 사용하였다. 실내시험으로 판별된 지반 물성치는 표 2와 같다. 압밀시험 시료의 직경과 높이는 각각 6.35cm와 2.54cm이다.

표 2. 비교란 시료의 실내시험결과

지반 물성치	시험결과
w_n	55~60
LL	56~58
PI	26~28
G_s	2.70~2.76
e_0	1.49~1.69
흙의 종류	MH

3.2 시험기기 및 방법

본 연구에서 사용된 압밀 시험기는 크게 재하장치, 압밀셀, 압력 조절장치로 구성된다. 재하장치는 GEOTEC社에서 제작된 것으로 단계재하, 일정변형률, 일정동수경사, 일정하중률, 일정압력비 압밀시험 등을 수행할 수 있는 자동화 다기능 압밀 시험기이다. 압밀셀은 GEOTEC社에서 제작된 것으로 밀폐되어 바닥면의 간극수압 및 Cell Pressure를 측정할 수 있는 압밀셀을 사용하였다. 압력 조절장치로는 TRAUTWEIN社의 PANEL을 사용하였다. 사용된 압밀시험의 종류는 바닥면의 간극수압을 측정하는 단계재하 압밀시험으로 시간에 따른 침하량과 간극수압을 측정하였다. 본 연구에서는 EOP 압밀곡선을 결정하기 위해서, 일차압밀 종료시점을 발생 과잉간극수압의 소산정도로 판단하였기 때문에, 측정되는 간극수압의 정확도를 필요로 한다. 측정 간극수압의 정확도를 높이기 위해, 밀폐 압밀셀에 약 100kPa의 배압을 가하여 B값이 98% 이상이 되도록 포화시켰으며, 포화도를 높이기 위해 NOLD社의 Deairator를 이용하여 물에 녹아있는 공기의 대부분을 제거하여 사용하였다.

이차압축지수(C_α) 측정을 필요로 하는 단계에서는 간극비-시간 곡선에서 직선부가 나타나는 시간까지 재하시간을 유지시켰으며, 바닥면에 연결된 Transducer로부터 발생하는 과잉간극수압을 측정하였다. Cell pressure는 유효 상재하중에 가까운 값으로 가하였다.

4. 실험 결과 및 분석

그림 1에 나타내었듯이 압밀시험을 통하여 얻어지는 EOP 압밀곡선에서 각 하중단계의 접선에 해당하는 C_c 를 구하고, 각 하중 단계별로 이차압밀을 유발시켜 시간에 따른 간극비의 변화량으로 C_α 를 산정하였다. 이차압축지수 산정은 EOP 이후 직선부를 보이는 부분에서 C_α 로 정의하였다.

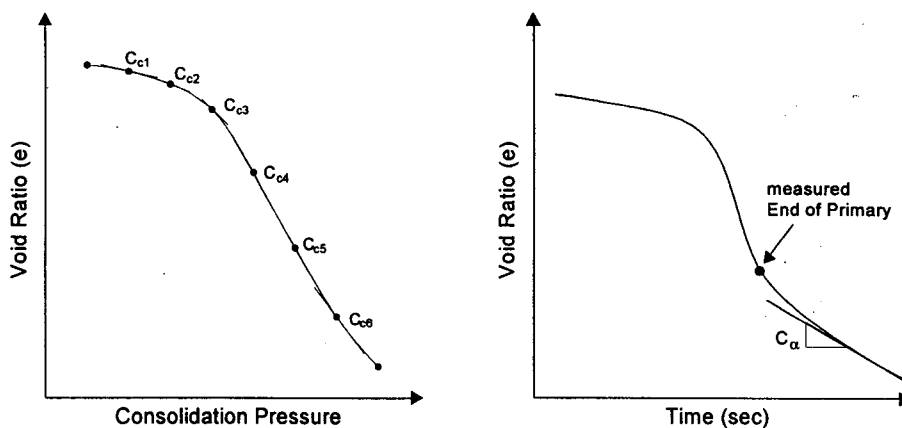


그림 1. EOP 압밀곡선과 간극비-시간 곡선에서의 C_α 와 C_c 의 산정

4.1 EOP e - $\log p'$ 곡선

일차압밀거동을 대표하는 EOP 압밀곡선을 산정하기 위해서, EOP 시점은 바닥면의 간극수압이 약 1kPa까지 소산된 시점으로 정의하였다. 각 하중단계별로 24시간동안 재하하는 표준압밀시험(IL₂₄)에 의한 압밀곡선은 이차압밀을 상당부분 포함하고 있으며, IL_{EOP}에 의한 압밀곡선과 차이가 있다. 그림 2는 IL_{EOP}와 IL₂₄에 의한 각각의 압밀곡선을 비교하여 나타내고 있다.

그림 2에서 알 수 있듯이, 각각의 방법에 따라 C_c 값을 산정하는데 있어서 차이가 생기게 된다. IL-1시험에서는 각 단계의 EOP시점이 거의 24시간에 가깝기 때문에 두 그래프간의 오차가 크지 않지만, IL-6의 경우에는 전반적으로 EOP에 빨리 도달하는 경우로서, 과압밀구간과 정규압밀구간 모두 C_c (과압밀구간에서는 C_r)가 크게 차이가 나는 것을 보여주고 있다.

대체적으로 EOP 곡선의 C_c 가 IL₂₄에 의한 압밀곡선의 C_c 에 비해 작은 값을 나타낸다. 이는, 간혹 표준압밀시험의 결과로부터의 C_c 를 C_a/C_c 의 관계에 이용하는 경우가 있는데, 표준압밀시험 결과의 C_c 가 IL_{EOP}에 의한 값보다 더 큰 값을 나타내므로, 이러한 경우는 C_a/C_c 를 실제보다 작은 값을 산정할 가능성이 있다.

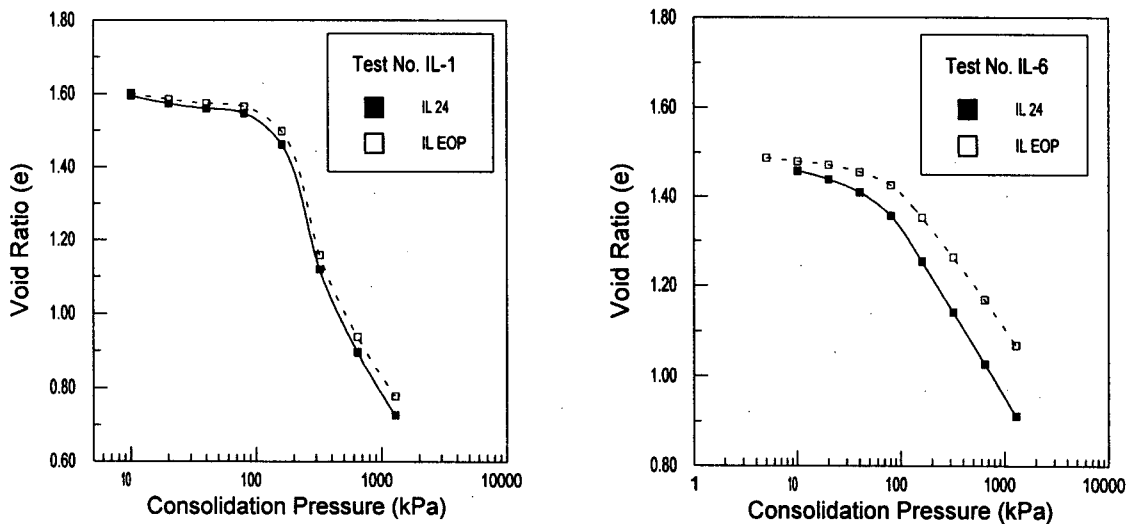


그림 2. IL_{EOP}와 IL₂₄에 의한 압밀곡선

4.2 압밀 압력에 따른 C_a 와 C_c

그림 3은 압밀압력에 따른 이차압축지수(C_a)와 압축지수(C_c)의 변화를 도시하였다. 각 시험에 대해서 압밀압력에 따른 각각의 지수의 거동 양상을 살펴보면, 초반에는 일정한 값을 보이다가 선행압밀하중이 가까워짐에 따른 급격한 증가 이후 선행압밀하중보다 큰 하중이 가해짐에 따라 다시 급격한 감소의 경향을 보인다. 그림에서 알 수 있듯이 두 지수는 서로 비슷한 거동을 보였으며, 또한 각각의 지수가 압밀압력에 따라 비슷한 범위의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 두 지수간의 관계가 선행관계를 가질 수 있다는 것을 의미한다.

그림 4는 그림 3에 나타낸 경우와 거동 양상이 다른 경우이다. IL-6의 경우, 시험후 확인한 결과 사용된 시료의 중간 부분에 실트 덩어리가 존재함을 알 수 있었다. 이 경우는 초반에 일정한 값 이후 선행압밀하중에 가까워짐에 따라 점점 증가하다가 선행압밀하중 이후에는 일정한 값을 가지는 경향을 나타내었다. 재성형시료에 대한 결과도 선행압밀하중 근처에서 급격한 증가 후 일정해지는 경향을 보인다. 이러한 경우에도 역시 압축지수와 이차압축지수는 거의 비슷한 모양의 거동양상을 나타내었다.

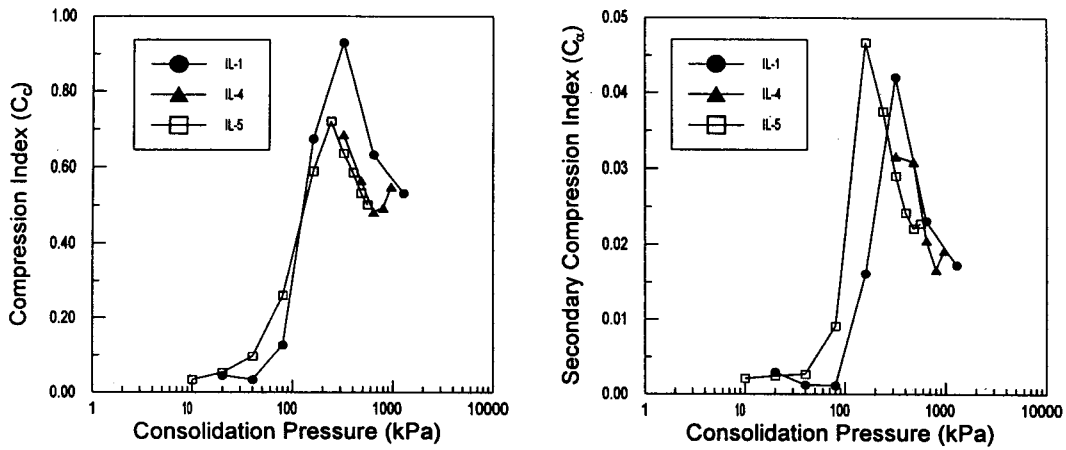


그림 3. 압밀압력에 따른 C_c 와 C_a 의 거동

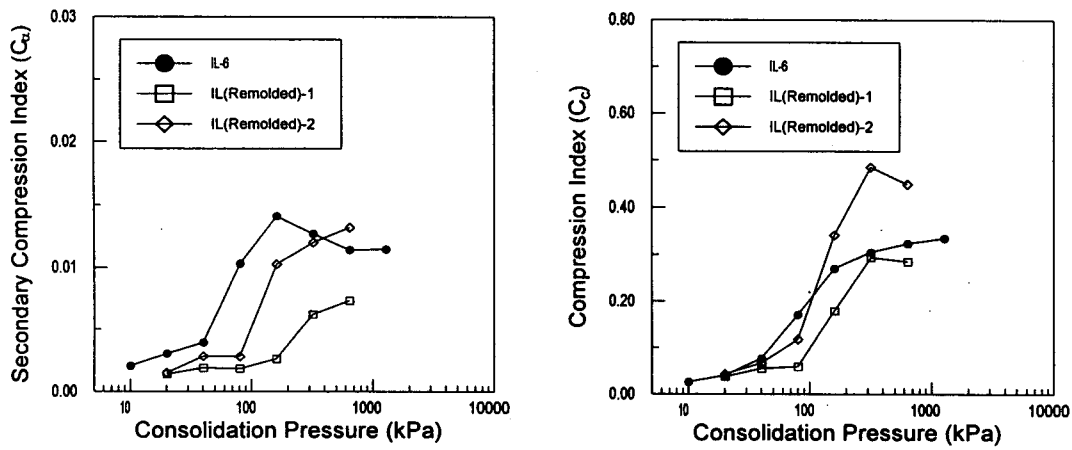


그림 4. 압밀압력에 따른 C_c 와 C_a 의 거동

불교란 시료에 대한 일련의 시험결과로부터의 C_a 와 C_c 의 관계를 도시하면 그림 5와 같다. 원점을 지나는 선형 회귀분석을 실시하였으며, 결과는 $C_a/C_c=0.0397$ 이었다. 회귀분석 상수는 $R^2=0.96$ 으로 매우 높은 상관 관계를 나타내었다.

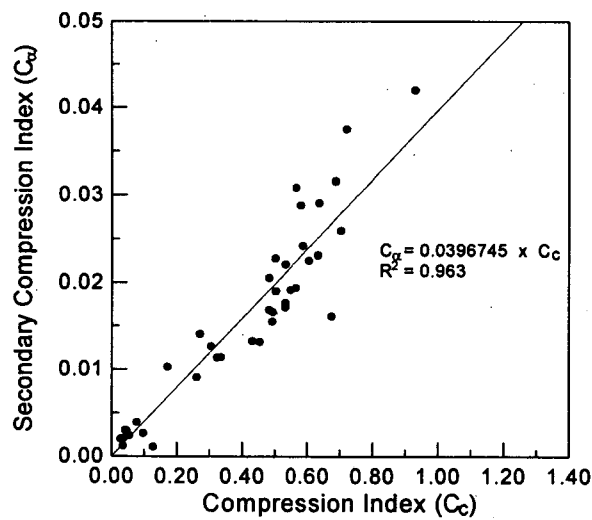


그림 5. 남해안 해성점토에 대한 C_a/C_c 관계

5. 결론

남해안 인근의 상부 해성퇴적층에서 채취된 해성점토에 대해서 바닥면의 간극수압을 측정하는 단계재하 압밀시험을 수행한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) EOP를 바닥면에서 측정되는 과잉간극수압이 약 1kPa까지 소산된 시점으로 정의했을 때, 산정된 EOP 압밀곡선은 이차압밀부분을 포함하고 있는 표준압밀시험에 의한 압밀곡선과 차이가 있었으며, C_c 값 산정에 있어서는 경우에 따라 크게 차이가 생길 수도 있다.
- 2) 압밀압력에 따른 C_a 와 C_c 의 거동 양상은 거의 동일하다는 것을 확인 할 수 있었으며, 이로부터 두 압축지수간의 관계인 C_a/C_c 의 비가 선형의 관계를 가진다는 특성을 파악할 수 있었다. 실내시험결과인 C_a/C_c 와 EOP 압밀곡선을 이용한 방법은 대상지반의 이차압밀 침하량을 간편하게 예측할 수 있다.
- 3) 압밀압력에 따른 C_a 와 C_c 의 거동양상은 초반 일정부와 선행압밀하중근처에서 급격한 증가 후 감소하는 경향을 보인다. 경우에 따라서는 선행압밀하중을 지난 시점에서 일정해지는 경우도 있다.
- 4) 동일한 위치의 불교란 시료에 대한, 압밀압력에 따른 C_a 와 C_c 의 값은 각 시험에 따라 거의 비슷한 범위의 값을 가짐을 알 수 있었다.
- 5) 남해안 해성점토의 $C_a/C_c=0.0397$ 의 결과를 나타냈다. 이는 Mesri와 Castro (1987)에서 제시한 비유기 질 점토에 대한 값인 $C_a/C_c=0.040\pm 0.01$ 과 유사한 결과이다.

6. 참고문헌

1. Crawford, C. B. (1964), "Interpretation of the Consolidation Test", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 90, No. SM5, pp. 87-102.
2. Crawford, C. B. (1986), "State of the Art: Evaluation and Interpretation of Soil Consolidation Tests", *Proceedings of Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, pp. 71-103.
3. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R. (1985), "New Developments in Field and Laboratory testing of Soils", *Proceedings of 11th ICSMFE*, San Francisco, Vol. 1, pp. 57-153.
4. Kabbaj, M., Tavenas, F., and Leroueil, S. (1988), "In Situ and Laboratory Stress-Strain Relationships", *Géotechnique*, Vol. 38, No. 1, pp. 83-100.
5. Kim, K. S. (1998), *Evaluation of C_a/C_c for Gaduk-do Soft Clay by Laboratory Consolidation Tests*, M.S.C.E. Thesis, Korea University.
6. Leonards, G. A. and Altschaeffl, A. G. (1964), "Compressibility of Clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 90, No. SM5, pp. 133-155.
7. Leroueil, S. (1988), "Tenth Canadian Geotechnical Colloquium: Recent Developments in Consolidation of Natural Clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 85-107.
8. Leroueil, S. (1996), "Compressibility of Clays: Fundamental and Practical Aspects", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 7, pp. 534-543.
9. Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., and Bouchard, R. (1985), "Stress-Strain-Strain Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays", *Gotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 159-180.
10. Mesri, G. (1973), "Coefficient of Secondary Compression", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 99, No. SM1, pp. 123-137.

11. 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.
12. Mesri, G. and Choi, Y. K. (1985a), "Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. GT4, pp. 441-464.
13. Mesri, G. and Choi, Y. K. (1985b), "The Uniqueness of the End-of-Primary (EOP) Void Ratio-Effective Stress Relationship", *Proceedings of 11th ICSMFE*, San Francisco, Vol. 2, pp. 587-590.
14. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), "Time and Stress Compressibility Interrelationship", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 103, No. GT5, pp. 417-430.