한국지반공학회 연약지반처리위원회 '99 학술발표회 / Feb. 26, 1999 / Seoul, Korea

실내압밀시험에 의한 남해안지역 연약점토의 C_α/C_c 평가

C_α/C_c for Soft Clay at the Southern Port of Korea by Laboratory Consolidation Tests

김규선[1], Kyu-Sun Kim, 임형덕[2], Hyung-Duk Lim, 이우진[3], Woo-Jin Lee

1) (주) 건일엔지니어링, 연구원, Researcher, Kunil Engineering Consultant., Co. Ltd.
2) 고려대학교 대학원 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.
3) 고려대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. Of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : Consolidation settlements on soft clay are often large and potentially damaging to structures. Currently, large-scale projects are in progress in Korea. These structures will be constructed on both thick and soft clay layers, and so the accurate evaluation of magnitude of settlement is required at every step in design and construction. Especially, secondary compression play an important role in consolidation settlements on soft clay. Generally, the magnitudes of secondary compression are evaluated by laboratory and in-situ consolidation tests or by empirical C_α/C_c relationships. The empirical C_α/C_c may not be only economical, but a fast and powerful tool in estimating secondary consolidation settlement. However, databases of the C_α/C_c relationship for sites in Korea are currently insufficient. The purpose of this study is to investigate the relationship of C_α/C_c on marine clay near the southern sea in Korea. In this study a series of incremental loading consolidation tests (measuring base pore water pressure) are performed. It was found that the C_α/C_c on undisturbed marine clay equaled 0.0397. This value is similar to the value proposed by Mesri and Castro(1987) for inorganic clay and silt.

Key words : Primary consolidation, Secondary consolidation, EOP curve, Incremental loading

1. 서론

연약지반상의 대규모 개발이 진행됨에 따른 국내 연약지반에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근 설계중이거나 진행중인 항만 혹은 공항 프로젝트들은 해안 인근의 연약지반에 건설된다. 두꺼운 압밀층이 존재하는 해안 연약지반의 활용이 증가함에 따라 이들 지반의 압밀특성을 정확하게 파악하는 것이 지반의 효율적인 개량을 위해서 매우 중요하다. 특히, 이러한 지반에는 무시하지 못할 만큼의 이차압밀량이 존재하는데, 이러한 이차압밀량을 예측하는 기법으로는, 일반적으로 현장 시험이나 실내 시험을 이용한다. 이차압밀은 오랜 시간동안 천천히 발생하므로, 이를 현장에서 실측하는 방법은 시간적으로나 경제적으로 많은 어려움이 따른다. 그러나, 대상지반에 대한 기존의 현장 혹은 실내 압밀시험 결과의 데이터 베이스를 이용한 경험적인 C_α/C_c의 관계의 비를 이용한다면, 간편하게 대략적인 이차압밀량을 추정할 수 있는 방법이 될 것이다. 이를 위해서는 많은 현장 혹은 실내 압밀시험을 통한 데이터 베이스가 구축이 선행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 국내 지반의 C_α/C_c 데이터 베이스 구축의 일환으로, 남해안 인근의 해성 퇴적층의 상부에서 채취된 불교란 시료를 바닥면의 간극수압을 측정하는 단계재하 압밀시험(IL_{EOP})을 이용하여, 각 압밀하중 단계별로 C_α와 C_c를 산정하여 두 계수간의 선형관계를 평가하였다. 결과로부터 산정된 대상지반의 C_α/C_c를 외국의 기존 연구 자료와 비교 해보았다.

2. 기존의 연구

2.1 이차압밀침하

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

$$s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_0 \tag{1}$$

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

이차압밀 단계에 접근하면서 압축율은 서서히 줄어든다. 시간 변화에 따른 간극비나 체적변형의 비를 이차압축지수($C_\alpha = \Delta e / \Delta \log t$)로 정의하는데, 이 값은 주어진 하중단계에 따라 일정한 값을 가진다고 정의한다 (Mesri와 Godlewski, 1977). 일정한 이차압축지수를 이용하여 시간-침하량 곡선의 관계로부터 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$s_s = \frac{C_\alpha}{1 + e_0} H_0 \log \frac{t_f}{t_p} \tag{2}$$

여기서, H_0 : 압축되는 지반의 두께

t_p : 일차압밀이 종료되는 시점

t_f : 이차압밀 발생후의 압밀량을 추정하고자 하는 대상 시간

2.2 C_α / C_c 개념

C_α/C_c 개념은 특정 지반의 일정한 C_α/C_c와 *EOP e-logp* 곡선의 이차압밀 거동을 정의한 것으로, 이는 압밀시험으로부터 간편한 이차압밀량 산정과 데이타 해석에 유용한 역할을 한다. C_α는 일차압밀단계에서 독립적인 거동이므로, 실험실에서의 결과를 현장에 직접적인 적용이 가능하다. 지반의 종류에 따라 특정한 값을 가지는 선형 관계를 이루므로, 어떠한 최종 압밀압력에서든지 EOP 압밀곡선의 모양으로부터 C_α의 거동을 예측할 수 있다.

Mesri와 Godlewski(1977)은 C_α와 C_c 사이의 관계에 대한 자세한 연구를 하였으며, 일차압밀과 이차압밀은 동일한 메커니즘에 의한 거동을 한다고 결론지었다. 그들은 C_α/C_c의 개념을 제안하였으며, 특정한 흙에 대하여, 시간, 유효응력, 간극비에 관계없이 C_α/C_c의 비는 일정하다고 결론지었다.

Mesri와 Castro(1987)는 여러 종류의 흙에 대해서 C_α/C_c가 0.02~0.1의 값을 가진다고 하였다. 무기질 점토에 대해 C_α/C_c=0.04±0.01, 유기질 점토에 대해서 C_α/C_c=0.05±0.01의 범위에 존재한다고 발표하였다.

표 1에 대략적인 토질 특성에 따른 C_α/C_c값의 범위를 나타내었다.

표 1. 흙의 종류에 따른 C_α/C_c 대표치

Material	C_α/C_c
Granular soils including rockfill	0.02±0.01
Shale and mudstone	0.03±0.01
Inorganic clays and silts	0.04±0.01
Organic clays and silts	0.05±0.01
Peat and muskeg	0.06±0.01

초기의 이차압밀에 해당하는 C_α는 EOP *e*-log*p* 곡선에서의 C_c와 C_α/C_c로부터 추정 가능하다. 식 (3)에 의해서, 최종 압밀압력에 의존하는 이차압밀량을 C_c의 값을 이용하여 추정할 수 있다.

$$s_s = \frac{C_\alpha/C_c \times C_c}{1+e_0} H_0 \log \frac{t}{t_p} \tag{3}$$

3. 시료준비 및 압밀시험

3.1 시료준비

본 시험에 사용된 시료는, 남해안 인근의 해성 퇴적층 상부 9~16m 지점에서 100mm 피스톤 샘플러로 채취된 불교란 시료이다. 압밀시험을 위해 시료 추출시, 시료통의 직경이 크기 때문에 생기는 벽면 마찰로 인한 교란을 막기 위해, 커팅 방법을 이용하였다. 불교란 시료는 양 끝단을 파라핀으로 봉하여 보관 기간동안 수분 증발을 억제하고, 실험 기간동안 현장 상태를 유지하기 위해 연직 보관하였으며, 매 실험 때마다 시료통을 커팅하여 사용하였다. 실내시험으로부터 판별된 지반 물성치는 표 2과 같다. 압밀시험에 사용된 시료의 직경과 높이는 각각 6.35cm와 2.54cm이다.

표 2. 불교란 시료의 실내시험결과

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

3.2 시험기기 및 방법

본 연구에서 사용된 압밀 시험기는 GEOCOMP社에서 제작된 것으로 단계재하, 일정변형률, 일정동수경사, 일정하중률, 일정압력비 등의 압밀시험과 CD, CU 삼축압축시험을 수행할 수 있는 자동화 다기능

시험기이다. 압밀셀에 가해지는 압력을 조절하기 위해서 TRAUTWEIN社의 PANEL을 사용하였다. 사용된 압밀시험의 종류는 바닥면의 간극수압을 측정하는 단계재하압밀시험(IL_{EOP})으로, 시간에 따른 침하량과 간극수압을 측정하였다. EOP 압밀곡선을 결정하기 위해서는, 발생 과잉간극수압의 소산정도(본 연구에서는 1kPa로 정의)로 판단하기 때문에 측정되는 간극수압의 정확도를 필요로 한다. 그렇기 때문에 밀폐 압밀셀에 약 100kPa의 배압을 가하여 B값이 98%이상이 되도록 포화시켰으며, 포화도를 높이기 위해 NOLD社의 Deairator를 이용하여, 시험전에 물에 녹아있는 공기를 제거하여 사용하였다.

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

4. 실험 결과 및 분석

4.1 해석방법

그림 1은 EOP 압밀곡선을 나타낸다. 각 하중단계에서 접선에 해당하는 기울기를 각 단계의 C_c로 정의한다. EOP 압밀곡선을 구하기 위해, EOP 시점은 바닥면의 간극수압이 약 1kPa까지 소산된 시점으로 정의하였다.

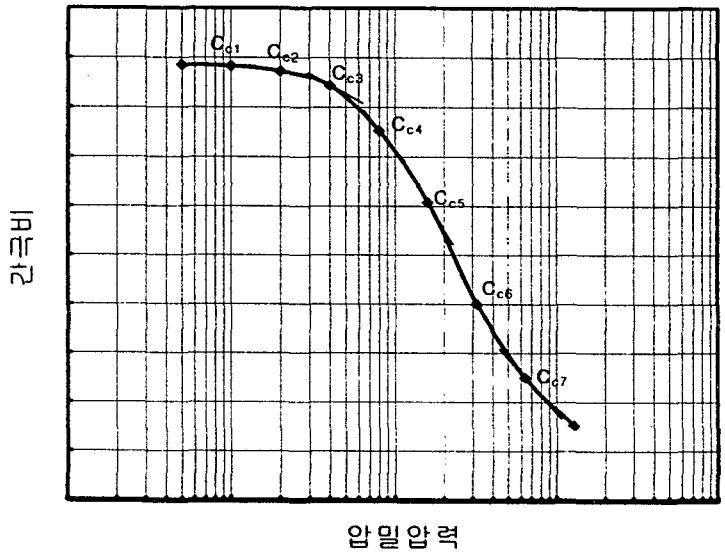

그림 1. EOP 압밀곡선에서의 압밀압력 단계에 따른 C_c의 산정 방법

이차압밀계수는 각각의 하중단계별로 EOP 이후 이차압밀을 유발시켜, 시간에 따른 간극비의 변화량으로부터 C_α를 산정하였다. 이차압축지수 산정은 EOP 이후 직선부를 보이는 부분에서 C_α로 정의하였다. 그림 2는 전형적인 이차압축지수 산정방법을 나타낸 그림으로, 일반적으로 EOP 지점에 도달하여도, 직선부를 나타내는 시점까지는 약간의 지체시간을 가지게 된다.

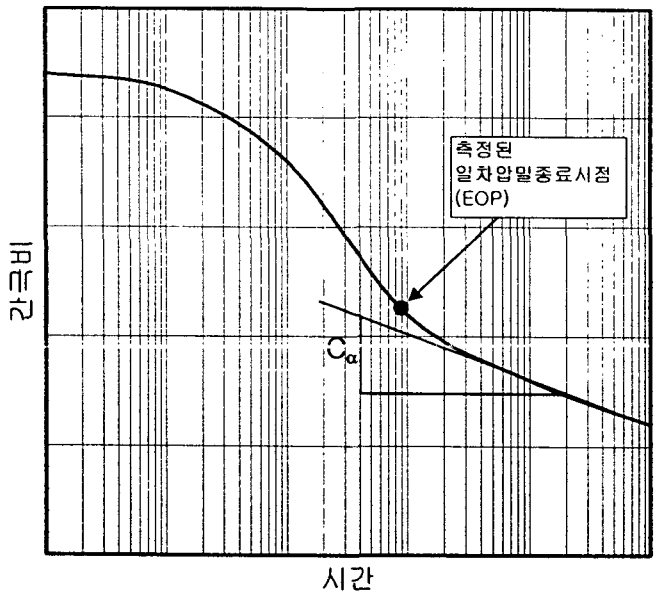

그림 2. 각 하중단계에서 간극비-시간 곡선에서의 C_α의 산정

4.2 압밀 압력에 따른 C_α와 C_c

그림 3과 그림 4는 압밀압력에 따른 압축지수와 이차압축지수의 변화를 도시하였다. 단계재하-1, 단계재하-4와 단계재하-5의 결과를 살펴보면, 초반에는 증가하는 경향을 보이다가 선행압밀하중을 지나서 급격히 떨어지는 결과를 나타낸다. 또한, 각 하중 단계별로 비슷한 범위의 값을 나타냄을 알 수 있다. 이런 결과로부터 두 지수는 압밀압력에 따라 서로 비슷한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 두 지수 간의 관계가 선형관계를 가질 수 있다는 것을 의미한다.

그림 5와 그림 6은 다른 경향을 보이는 결과이다. 시험시료 내의 실트 성분이 다수 포함된 것으로, 시료 중간부에 실트 덩어리가 있음을 시험후 확인하였다. C_α/C_c의 비는 기존의 시험들과 비교하여 크게 차이가 나지는 않았지만, 압밀압력에 따른 압축지수와 이차압축지수의 거동은 다르게 나타났다. 압밀압력에 따른 각 지수는 초반부에는 증가하다가, 하중단계가 커짐에 따라 일정한 값에 도달하는 것으로 나타났다.

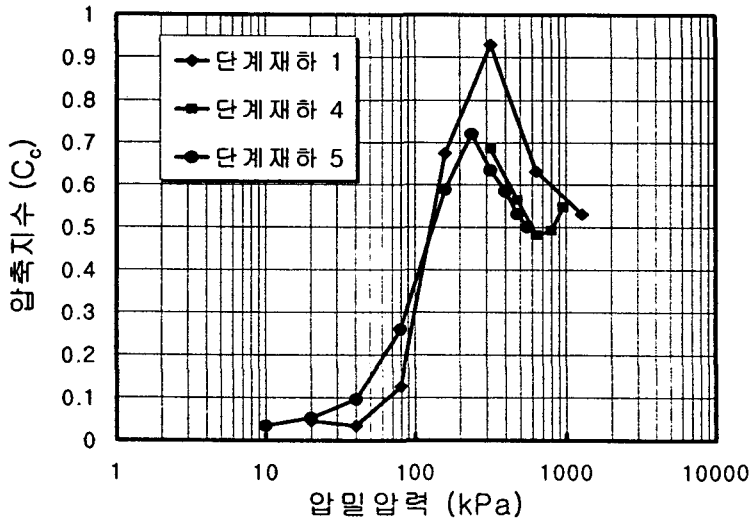

그림 3. 압밀압력에 따른 압축지수의 거동

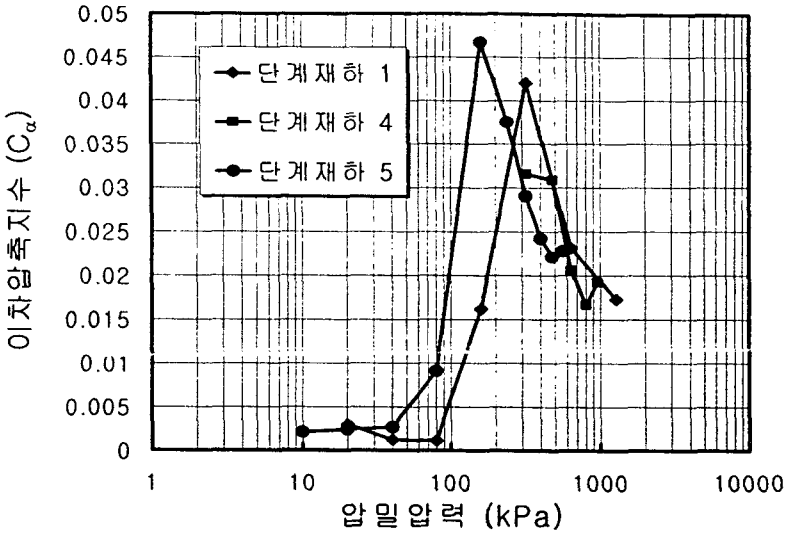

그림 4. 압밀압력에 따른 이차압축지수의 거동

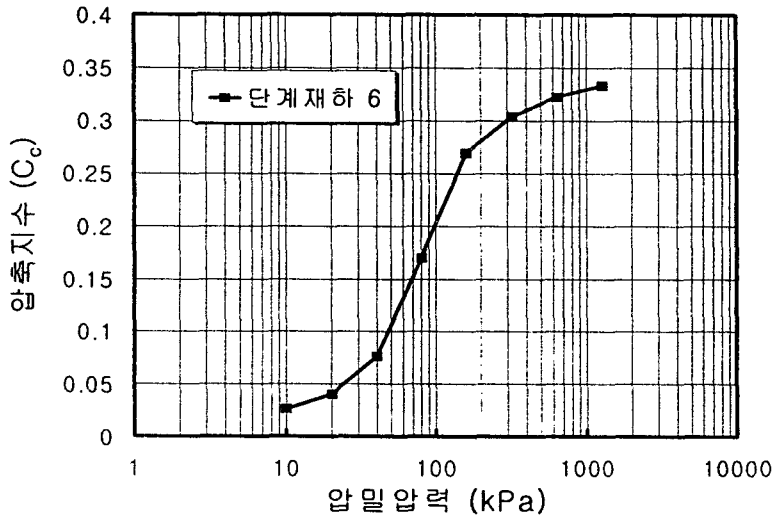

그림 5. 압밀압력에 따른 압축지수의 거동

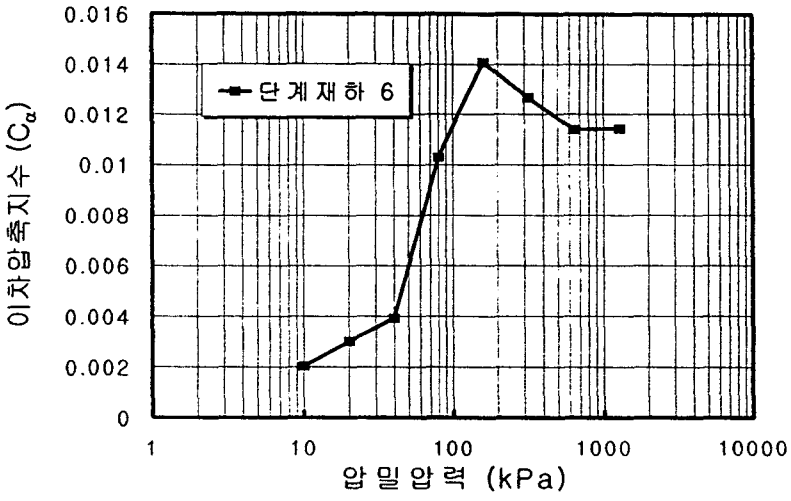

그림 6. 압밀압력에 따른 이차압축지수의 거동

압밀압력에 따른 압축지수와 이차압축지수의 관계를 도시하고 회귀분석한 결과는 그림 7와 같다. 회귀분석은 원점을 통과하는 선형 회귀분석을 실시하였으며, 결과는 C_α/C_c=0.0397 이었다. 이는 Mesri 와 Castro(1987)에서 제안한 비유기질 점토에 대한 값과 유사한 값이다.

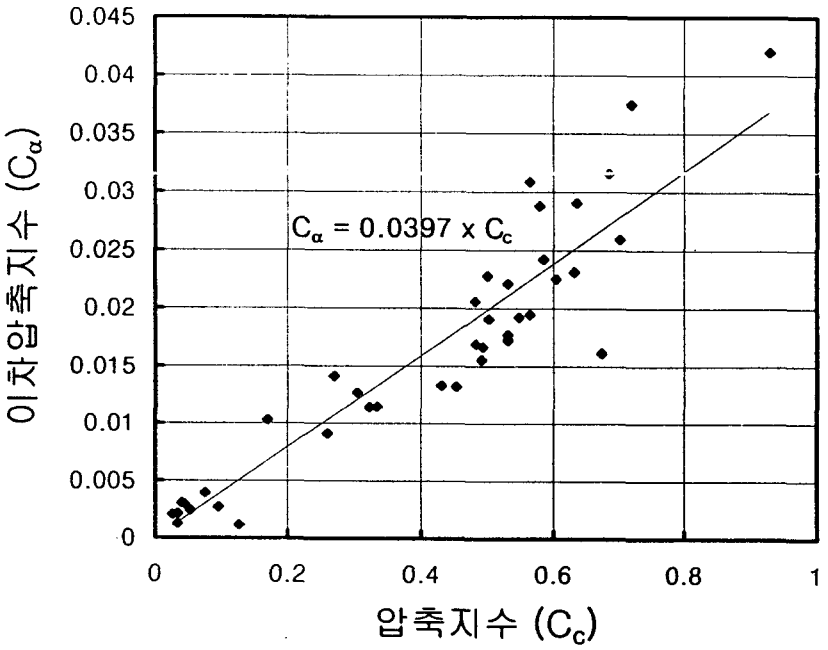

그림 7. 남해안 해성점토에 대한 C_α/C_c 관계

5. 결론

남해안 인근의 상부 해성 퇴적층에서 채취된 불교란 시료에 대해서, 바닥면의 간극수압을 측정하는 단계재하압밀시험을 수행한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 일차압밀종료시점(EOP)을 과잉간극수압이 거의 소산된 시점으로 정의하여 EOP 압밀곡선을 산정할 수 있다. EOP 이후의 이차압밀부는 지체시간을 가진 후 간극비-시간 곡선에서 직선을 나타낸다.

2) 압밀압력에 따른 이차압축지수와 일차압축지수의 거동은, 초반부 증가하다가 선행압밀하중을 지나면서 급격히 감소하는 경향을 보인다. 같은 종류의 시료에 대한 시험결과로부터 각각의 시험에 대해 하중단계에 따른 이차압축지수, 일차압축지수의 거동을 도시한 결과, 각 압밀압력에 따라 비슷한 범위의 값을 가짐을 알 수 있다.

3) 압밀압력에 따른 C_α와 C_c는 동일한 거동을 나타낸다. 이는 두 압축지수간의 관계인 C_α/C_c의 비가 선형의 관계임을 의미한다. 실내시험결과인 C_α/C_c와 EOP 압밀곡선을 이용하여 대상지반의 이차압밀 침하량을 간편하게 예측할 수 있다.

4) 남해안 해성점토는 C_α/C_c=0.0397의 결과를 나타냈다. 이는 Mesri와 Castro(1987)가 제시한 비유기질 점토에 대한 값인 C_α/C_c=0.040±0.01과 유사한 결과이다.

6. 참고문헌

1. 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*, SanFransisco, Vol. 1, pp. 57-153
2. Kabbaj, M., Tavenas, F., and Leroueil, S. (1988), "In situ and Laboratory Stress-Strain Relationships", *Géotechnique*, Vol. 38, No. 1, pp. 83-100.
3. Kim, K. S. (1998), *Evaluation of C_α/C_c for Gaduk-do Soft Clay by Laboratory Consolidation Tests*, M.S.C.E. Thesis, Korea University.
4. Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., and Bouchard, R. (1985), "Stress-Strain Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays", *Géotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 159-180.
5. 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.
6. Mesri, G. (1973), "Coefficient of Secondary Compression", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 99, No. SM1, pp. 123-137.
7. Mesri, G. and Castro, A. (1987), "The C_α/C_c Concept and K_0 During Secondary Compression", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 113, No. GT3, pp. 230-247.
8. 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.
9. 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.
10. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), "Time and Stress Compressibility Interrelationship", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 103, No. GT5, pp. 417-430.