

## 부산점토의 변형률 속도 의존적인 압밀특성

### Strain-rate-dependent consolidation characteristics of Busan clay

김윤태<sup>1)</sup>, Yun-Tae Kim, 조상찬<sup>2)</sup>, Sang-Chan Jo, 조기영<sup>3)</sup>, Gi-Young Jo

<sup>1)</sup> 부경대학교 해양공학과 조교수, Assistant professor, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National Univ.

<sup>2)</sup> 부경대학교 해양공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National Univ.

<sup>3)</sup> 부산광역시 도시개발공사, Busan Urban Development Corporation.

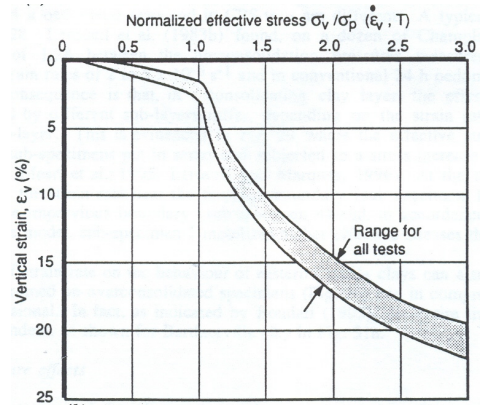
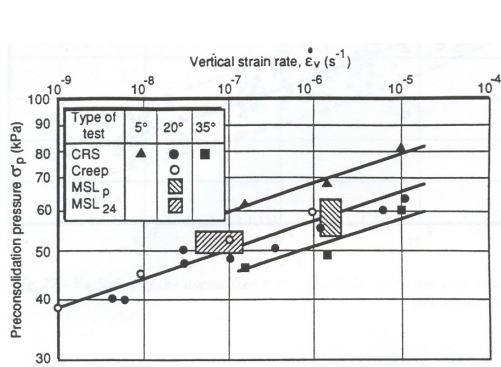
**SYNOPSIS** : In order to analyze effects of strain rate on consolidation characteristics on Busan clay, a series of constant rate of strain(CRS) consolidation tests with different strain rate and incremental loading test(ILT) were performed. From experimental test results, it was found that the preconsolidation pressure was dependent on the corresponding strain rate occurred during consolidation process. Also, consolidation curves normalized with respect to preconsolidation pressure gave a unique stress-strain curve. Coefficient of consolidation and permeability estimated from CRS test had a tendency to converge to a certain value at normally consolidated range regardless of strain rate. An increase in excess pore pressure without change of total stress was noted on the incremental loading test after the end of loading.

**Key words** : Consolidation, CRS test, Strain rate, Preconsolidation pressure

## 1. 서 론

최근 국가산업의 발전과 국민경제의 활성화에 따라 부족한 산업부지 확충과 새로운 건설부지 확보 차원에서 준설·매립된 인공지반 뿐만 아니라 해안 연약지반의 활용이 점차 증가하고 있다. 특히 대규모 연약지반으로 이루어져 있는 부산 인근의 낙동강 하구 일대는 두터운 충적층이 약 70m 전후의 두께로 분포하고 있다. 이러한 낙동강 하구 일대의 연약지반 위에 부산 신항만을 건설을 비롯한 대규모 공사들이 실시됨에 따라 이들 지역의 연약지반에 대한 압밀특성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다.

연약점토는 일반적으로 정규압밀영역이나 과압밀영역에서 크리프(creep) 거동, 비배수 상태에서 유효응력의 완화(relaxation), 변형률 속도(strain rate)에 의존하는 비배수 전단강도 및 선행압밀하중 등과 같은 다양한 시간의존적인 거동특성을 나타낸다(김윤태 등, 1999). 또한 점토에 대한 시간 및 변형률 속도의 영향은 수십년 동안 연구되어 왔다(Taylor, 1942; Crawford, 1965; Bjerrum, 1967). Leroueil 등(1985)은 일차압밀끝에서( $MSL_v$ ) 혹은 24시간 후에( $MSL_{24}$ ) 재하중을 가하는 다단계 하중시험, 일정 변형률 속도시험(constant rate of strain test, CRS), 동수경사제어시험(controlled gradient test, CGT), 크리프시험(long-term creep test)등을 통하여 일차원 압밀하에서 자연점토의 거동을 유효응력-변형률-변형률 속도( $\sigma_v' - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$ )로 표현하였다. 응력-변형률-변형률 속도 관계는 그림 1에 나타난 것과 같이 두 가지 중요한 특성을 가진다. 첫째, 선행압밀하중은 재하중동안에 유발되는 변형률 속도에 의존한다(그림 1a). 둘째, 다양한 변형률 속도에서 얻어진 응력-변형률곡선은 선행압밀하중에 대해서 정규화되었을 때 유일(unique)하다(그림 1b).



(a) 변형률 속도에 의존하는 선행압밀하중

(b) 선행압밀하중으로 정규화된 유효응력-변형률 곡선

그림 1. Berthierville clay에 대한 실험결과 (Leroueil 등, 1985)

실험실과 현장에서 일반적으로 유발되는 변형률 속도는 그림 2에 나타내었다. 현장에서 유발되는 변형률 속도는 지반의 투수계수, 배수거리 등과 관련된 압밀특성에 의존하며, 일반적으로  $10^{-9}/\text{sec}$ 보다 작다. 그러나 실내 시험시 유발되는 변형률 속도는 일반적으로  $10^{-7}/\text{sec}$ 보다 크다. 따라서 현장과 실험실의 변형률 속도는 차이는 평균 2-4계 (order) 정도이다(Leroueil 등, 1996; 김운태, 2003). 시간의존적인 압밀침하가 현장 지반에서 유발되는 변형률 속도에 의존하는 점소성 거동특성을 나타낸다. 따라서 실험실(lab.)에서 구한 거동특성과 물성치를 바탕으로 실시공시 유발되는 현장(in-situ) 거동특성을 보다 정확히 예측하기 위해서는 실험실과 현장 거동사이의 변형률 속도 차이를 고려할 필요가 있다. 이를 위해서는 부산점토 지반에 대한 변형률 속도 의존적인 압밀특성을 우선 규명해야 한다.

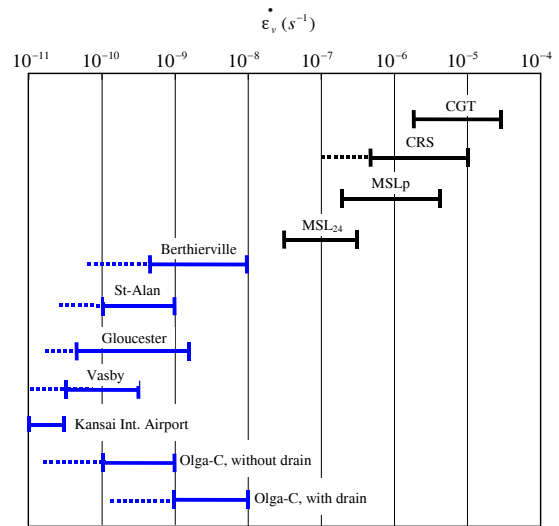


그림 2. 실험실과 현장에서 주로 유발되는 변형률 속도의 범위(김운태, 2003)

따라서 본 연구에서는 부산 신항만 건설지역의 불교란 점토를 이용하여 다양한 변형률 속도에 대한 일정변형률 속도(CRS) 시험을 실시하고 그 결과를 통해 부산점토의 변형률 속도 의존적인 압밀특성을 연구하였다. 또한 기존의 oedometer가 아닌 연속적으로 시험결과를 얻을 수 있는 시스템을 이용해 하중제어 압밀시험을 실시하여 CRS 시험결과와 비교·분석을 실시하였다.

## 2. 일정변형률 속도 시험 (CRS test)

### 2.1 시험 시료

본 연구에 사용된 시료는 부산 신항만 배후단지 북동호안의 해성점토로서 시료는 76mm 직경의 thin wall tube로 채취하였고, 채취된 시료의 깊이는 약 22m 이다. 시험에 사용된 시료의 물리적 특성은 표 1과 같이 비중이 2.6, 함수비가 63%로서 통일분류법상 CH로 분류된다. 본 압밀시험에 사용된 시편의 직경은 63.5mm, 높이는 25.4mm이다.

표 1. 시료의 물리적 특성

물성치	No.200체 통과율	비중	함수비(%)	액성한계(%)	소성지수(%)	USCS
실험결과	99%	2.6	63	58	23	CH

## 2.2 시험 장치 및 방법

일반적으로 연약점토의 압밀특성을 파악하기 위해 Terzaghi의 이론에 근거한 표준압밀시험이 현재까지 널리 이용되고 있지만, 압밀시험 시간이 오래 소요되며 단계 하중을 재하하여 변형을 측정하는 하중 제어 압밀시험이라는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 연속적인 응력-변형률 시험결과를 얻을 수 있고 빠른 시간내에 압밀특성을 파악할 수 있는 일정변형률 압밀시험이 널리 이용되고 있다.

본 시험에서 사용한 장치는 미국 GEOCOMP사에서 제작한 시험 장치로서 사진 1과 같이 로드 프레임, 압밀셀, 자료 입출력장치, 컴퓨터, 가압장치, 측정장치로 구성되어 있다. 먼저 샘플링 튜브를 통해 준비한 시료를 벽면 마찰을 고려해 구리스를 바른 압밀링으로 직경 63.5mm와 높이 25.4mm로 성형하여 압밀셀을 조립한다. 그리고 표 2와 같이 80kPa의 초기하중(seating load)을 가함으로서 시료를 초기화시킨다. 그 후 완전포화를 위해 일정한 배압(back pressure)을 300kPa까지 가하여 24시간 동안 유지하였다. 이후 포화가 되었다고 판단되면 변형율을 0.01%/sec, 0.001%/sec, 0.0001%/sec의 속도로 가해 수직 응력과 과잉간극수압 및 수직변위를 하중측정장치(load cell), 간극수압 측정장치(pore pressure transducer)와 변위측정장치(LVDT)로부터 동시에 측정한다. 압밀 동안에도 배압은 일정하게 유지하였다. 각 시험별 방법은 표 2와 같다.



사진 1. CRS equipment

표 2. 표준압밀 및 CRS 시험 방법

깊이	시험번호	변형률 속도 (%/sec)	초기응력(kPa)	초기간극비	함수비(%)	액성한계(%)	비중
28m	ILT	-	-	1.68	71	58	2.6
22m	CRS-1	$1 \times 10^{-2}$	80	1.7	65	58	2.6
22m	CRS-2	$1 \times 10^{-3}$	80	1.7	61	58	2.6
22m	CRS-3	$1 \times 10^{-4}$	80	1.7	63	58	2.6

## 3. 시험 결과 분석

### 3.1 유효응력-변형률-변형률 속도

그림 3은 변형률 속도를 달리한 CRS 시험에 의해 산정된 유효응력과 변형률의 관계를 나타내고 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이 변형률 속도가 클수록 그래프가 우측에 위치한다. 즉 동일한 변형률에서 변형률 속도가 커짐에 따라 응력이 증가하며, 이것으로부터 흙의 압축성은 변형률 속도에 의존적임을 알 수 있다. 이와같은 변형률 속도 의존적인 압밀특성은 Leroueil 등(1987), 이우진 등(1998), 김영수

등(1998)의 연구결과와 일치한다. 또한 하중제어 압밀시험(ILT)은 변형률 속도  $10^{-4}\%/sec$ 의 응력-변형률 곡선과 비슷한 경향을 가진다.

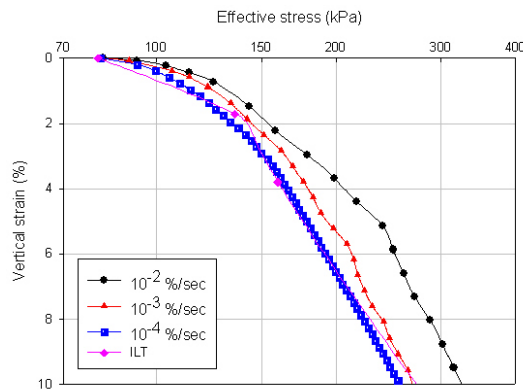


그림 3. 부산 점토의 변형률 속도 의존적인 응력-변형률 곡선

### 3.2 과잉간극수압

CRS 압밀 시험은 압밀시험 중 시료의 상단으로 배수를 허용하고 시료 하단에 설치된 간극수압계를 이용하여 과잉간극수압을 측정하게 된다. 일정한 변형률로 하중이 재하되면 그로 인한 과잉간극수압이 발생하게 된다. 그 결과로서 그림 4를 보면 과압밀 영역에서는 하중으로 인한 과잉간극수압이 작게 발생하지만 선형압밀하중을 지나 정규압밀영역에서는 갑자기 커지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 유효응력이 선형압밀하중에 도달한 후에 흙 구조의 붕괴(collapse of soil structure)가 급격히 유발되기 때문이다. 또한 변형률 속도가 적을 경우( $\dot{\epsilon}_v = 10^{-4}\%/sec$ )에는 과잉간극수압이 거의 유발되지 않지만, 변형률 속도가 증가할수록 최대 과잉간극수압은 커진다는 것을 확인할 수 있다.

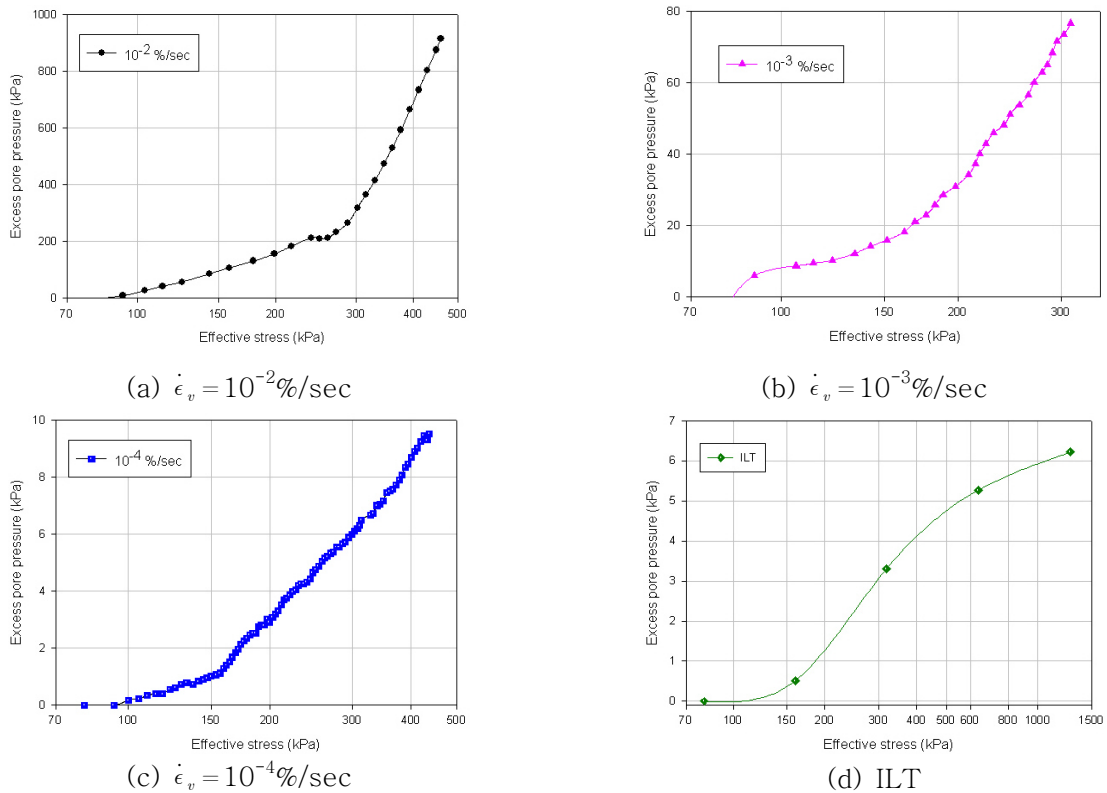


그림 4. 유효응력-과잉간극수압 곡선

### 3.3 선행압밀하중

연약지반의 거동에 중요한 영향을 미치는 선행압밀하중은 전응력의 변화, 지하수의 위치변화에 따른 간극수압의 변화, 변형률 속도의 변화 및 aging, 2차 압밀에 의한 흙구조의 변화 등과 같은 여러 가지의 원인에 의해 영향을 받는다.

CRS 시험 결과로부터 선행압밀하중을 산정하기 위하여 여러 학자들이 제안한 다양한 방법을 사용하였다. 가장 널리 이용되는 Casagrande(1936)의 방법을 비롯하여 Janbu(1969)방법,  $\log(1+e) - \log\sigma'$  곡선을 이용하는 Oikawa(1987)방법, Janbu 방법을 이용하여 과잉간극수압의 변화지점을 통한 결정법 등을 통해 선행압밀하중을 산정하여 표 3에 정리하였다. Janbu 방법을 이용하여 산정된 선행압밀하중이 다른 방법에 의해 산정된 선행압밀하중보다 일반적으로 작다는 것을 알 수 있다.

표 3. 여러 가지 방법을 통해 구한 선행압밀하중

Strain rate 선행압밀하중 결정법	$10^{-2}\%/sec$	$10^{-3}\%/sec$	$10^{-4}\%/sec$	ILT
Casagrande 방법	190kPa	170kPa	140kPa	160kPa
Janbu 방법	180kPa	150kPa	140kPa	150kPa
Oikawa 방법	220kPa	170kPa	155kPa	160kPa
과잉간극수압의 급변점	240kPa	170kPa	150kPa	160kPa

그림 5에는 일련의 CRS시험을 통해 얻은 선행압밀하중을 기존의 Batiscan과 Berthierville 점토의 결과와 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 부산점토 역시 변형률 속도가 증가함에 따라 선행압밀하중이 비례하여 증가함을 알 수 있다. 즉, 선행압밀하중은 압밀시 유발되는 변형률 속도의 함수라는 것을 확인할 수 있다. 그리고 부산점토의 변형률 속도에 대한 선행압밀하중의 기울기( $\log\sigma'_{pc} - \log\dot{\epsilon}_v$ 의 관계)는 Batiscan과 Berthierville 점토의 기울기와 비슷하다고 할 수 있다. 그림 6은 선행압밀하중으로 정규화된 응력-변형률 곡선으로서 앞서 살펴본 Leroueil 등(1985)의 결과와 비슷한 경향을 나타낸다. 또한 변형률이 3% 정도의 지점에서 변형률 속도에 관계없이 선행압밀하중과 연직유효응력이 동일한 값을 가지는 것을 알 수 있다.

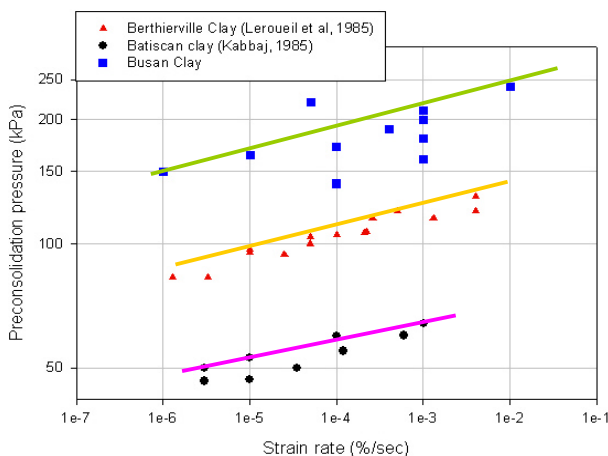


그림 5. 변형률 속도에 따른 선행압밀하중

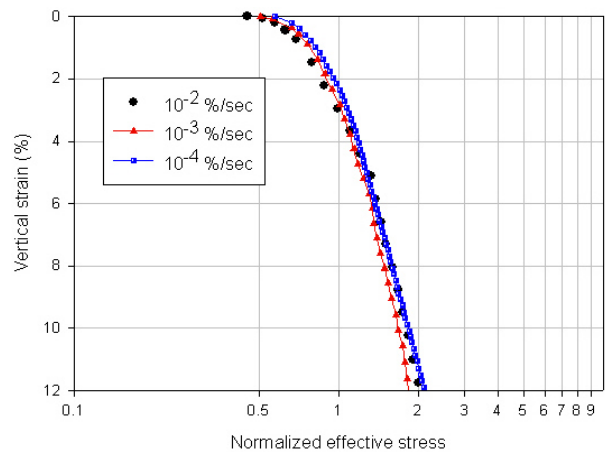


그림 6. 정규화된 응력-변형률 곡선

### 3.4 압밀계수와 투수계수

CRS 압밀시험은 시료 하단의 과잉간극수압을 측정하여 압밀계수(coefficient of consolidation)와 투수계수(coefficient of permeability)를 산정하게 된다. 그림 7과 8은 변형률 속도에 따른 압밀계수와 투수계수를 나타내었다.

수계수의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 과압밀 영역에서는 동일한 유효응력에서 변형률 속도가 커짐에 따라 압밀계수와 투수계수의 값도 커지지만, 정규압밀영역에서는 시간이 경과함에 따라 일정한 값으로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그리고 부산 신히만 북동호안의  $C_v$  값은 대략  $4 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다.

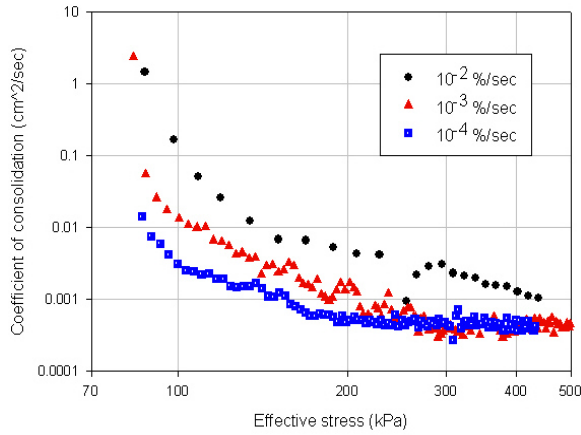


그림 7. 압밀계수의 변화

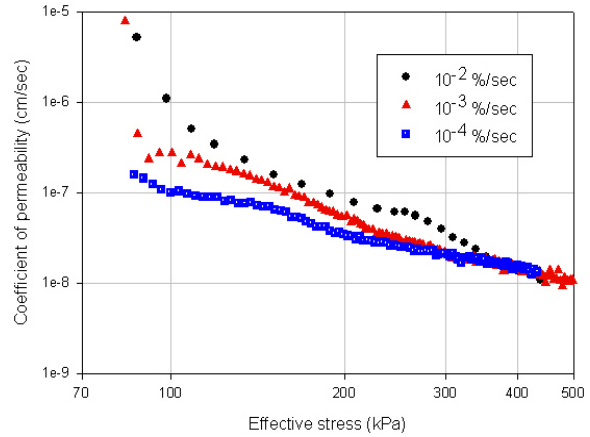


그림 8. 투수계수의 변화

#### 4. 하중제어 압밀시험

선형압밀하중, 압축지수 및 압밀계수 등 압밀 침하예측에 필요한 압밀정수를 산정하기 위해 기존의 일차원 표준압밀시험이 많이 사용되어 왔지만 연속적인 데이터를 얻을 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 CRS 시험장치를 이용하여 그림 9와 같이 표준압밀시험과 동일한 하중제어 압밀 시험을 실시하였고 그 결과 기존의 표준압밀시험에서는 얻을 수 없었던 연속적인 유효응력-변형률 관계를 구할 수 있었다.

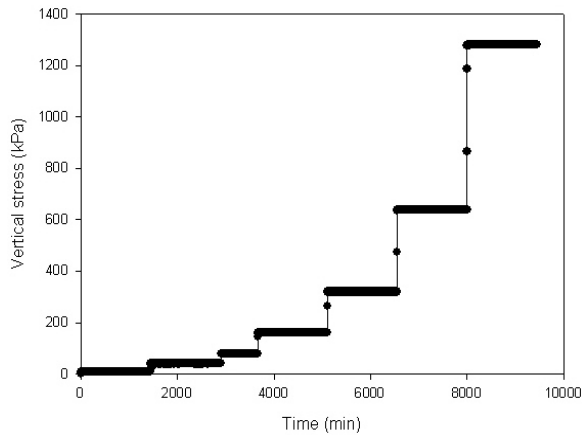


그림 9. 하중제어 압밀시험의 응력조건

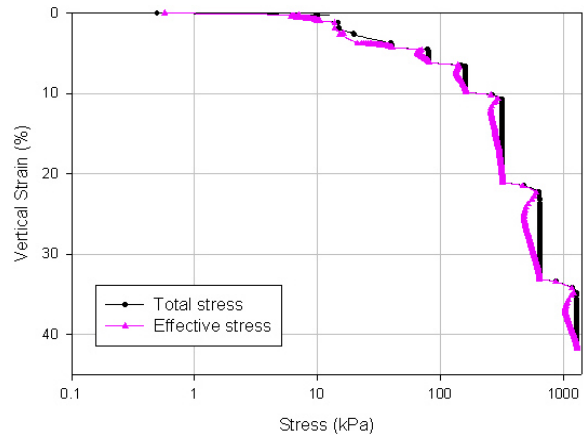


그림 10. 하중제어 압밀시험의 응력-변형률 곡선

그림 10은 압밀시험을 통해 구한 응력-변형률 곡선으로서 각 하중단계에서의 연속적인 전응력 및 유효응력의 변화를 잘 나타내고 있다. 각 단계마다 아주 빠른(60초) 시간 내에 하중을 재하하고 일정하게 유지시켰는데, 그림 10에서 보는 바와 같이 모든 단계에서 초기에는 전응력이 증가함에 따라 유효응력이 증가하였다. 그러나 일정한 전응력하에서 유효응력이 감소하였다가 다시 증가 하는 현상을 볼 수 있었다. 보다 구체적으로 살펴보기 위해 시간에 따른 유효응력과 과잉간극수압의 변화를 하중 증가량으로 정규화시켜서 그림 11에 나타내었다. 이러한 결과는 불연속적인 시험결과를 얻는 고전적인 표준압밀시

험에서는 볼 수 없었던 것으로서 하중제하가 끝났음에도 불구하고 과잉간극수압이 계속 증가하고 유효응력이 감소하는 Mandel-Cryer 효과를 보여주고 있다.

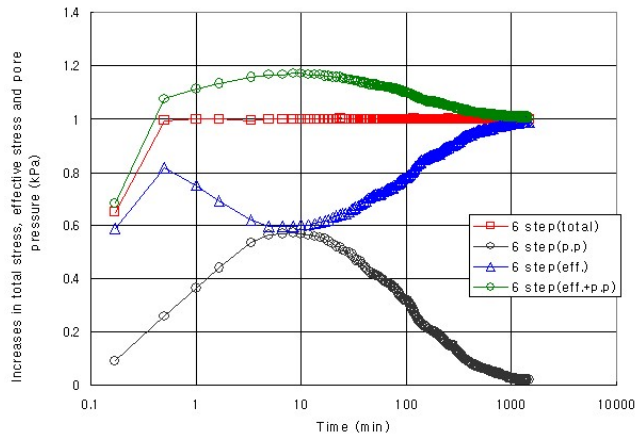


그림 11. 시간에 따른 유효응력과 간극수압

## 5. 결론

본 연구에서는 부산 신항만 배후부지 북동호안 건설현장의 점토를 이용하여 부산점토의 변형률 속도에 대한 압밀특성을 파악하기 위하여 일련의 CRS 시험을 실시하였으며, 그에 따른 결과들을 비교·분석하였다. 또한 연속적인 시험결과를 얻을 수 있는 하중제어 압밀시험을 통해 하중제하가 끝난 후 간극수압과 유효응력의 변화를 계측하였다.

- 1) 변형률 속도의 영향을 받는 응력-변형률 곡선의 분포를 통해 흙의 압축성은 변형률 속도에 의존적임을 알 수 있었다.
- 2) 일정한 변형률 속도하에서 생성되는 과잉간극수압은 과압밀영역에서는 작은 값을 보이거나 흙 구조의 붕괴가 급격히 일어나는 선행압밀하중 이후부터 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었고, 변형률 속도가 증가할수록 과잉간극수압의 크기도 크게 증가하는 결과를 얻었다.
- 3) 선행압밀하중을 Casagrande, Janbu, Oikawa 등의 방법을 사용하여 산정한 결과, 기존의 Batiscan과 Berthierville의 점토에서와 마찬가지로 선행압밀하중은 변형률 속도에 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 그리고 다양한 변형률 속도에서 얻어진 압밀곡선은 선행압밀하중에 대해서 정규화되었을 때 유일함(unique)을 확인하였다.
- 4) CRS 시험으로부터 얻은 압밀계수와 투수계수는 과압밀영역에서는 변형률 속도에 따라 다른 값을 나타내었지만, 정규압밀영역에서는 하나의 값에 수렴하는 경향을 보였다. 그리고 부산 신항만 북동호안의  $C_v$  값은 대략  $4 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다.
- 5) 기존의 oedometer가 아닌 연속적으로 시험결과를 얻을 수 있는 시스템을 이용하여 하중제어 압밀시험을 실시한 결과 전응력이 일정한 상태, 즉 변형률 속도가 zero인 상태에서 과잉간극수압이 증가하고 유효응력이 감소하는 Mandel-Cryer 효과가 발생하였다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-10635-0)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 김영수, 이상웅, 김대만, 현영환(2004), Aging Effect를 고려한 점성토의 압밀특성, 한국지반공학회 논문집 제 20권 6호 pp.109~118
2. 김운태, S. Leroueil(1999), 자연점토의 변형률속도 의존적인 압밀거동의 해석, 한국지반공학회 논문집 제 15권 6호
3. 김운태(2003), 지반개량 및 미개량 연약지반의 해석, 한국지반공학회 연약지반 기술위원회 2003 학술세미나, Seoul, Korea, pp. 73~95.
4. 이우진, 임형덕, 이원제(1998), 일정변형률 및 표준압밀시험을 이용한 해성점토의 압밀특성 연구, 한국지반공학회 제 14권 4호
5. 이 송, 박중배, 채점식(2001), 연속재하압밀시험방법에 따른 점성토 지반의 압밀특성, 대한토목학회 논문집 제 21권 3-C호 pp.299~309
6. ASTM Designation, D4186-82, Standard Test Method for One-dimensional Consolidation Properties of Soils using Controlled Strain Loading
7. Becker, D.E., Jefferies, M.G., Shinde, S.B., and Crooke, J.H.A. (1985). "Porewater pressures in clays below caisson islands." In Proceeding of Arctic '85: Civil Engineering in the Arctic Offshore, San Francisco. Pp. 75-83.
8. Bjerrum, L. (1967). "Engineering geology of normally consolidated marine clays as related to the settlements of buildings," Geotechnique, Vol. 17, No. 2, pp. 83-119.
9. Casagrande, A.(1936), "The Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance, *Proceedings of 1st ICSMFE*, Cambridge, Vol. 3, pp. 60~64.
10. Chang, Y.C.E.(1981). "Long term consolidation beneath the test fill at Vasby, Sweden." Swedish Geotechnical Institute, Report 13, Linkoping, Sweden.
11. Crawford, C.B. (1965). "The resistance of soil structure to consolidation." Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2(2), pp. 90-97.
12. Crawford, C. B.: State of the Art-Evaluation and Interpretation of Soil Consolidation Tests , Consolidation of Soil: Testing and Evaluation, ASTM STP 892, R.N. Yong and F.C. Townsend
13. Janbu, N.(1969), "The resistance Concept Applied to Deformation of Soils", *Proceedings of 6th ICSMFE*, Mexico city, Vol.1, pp. 191~196.
14. Kabbaj, M., Tavenas, F. and Leroueil, S.(1988). "In situ and laboratory stress-strain relationships." Geotechnique 38, No.1, pp 83-100.
15. Leroueil, S., M.Kabbaj and F.Tavenas.(1998): Study of the validity of  $\sigma' - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$  model in in situ conditions
16. Leroueil, S., and Kabbaj, M., and Tavenas, F., and Bouchard, R. (1985). "Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of natural sensitive clays." Geotechnique, 35(2), 159-180.
17. Oikawa, H.(1987), "Compression curve of soft soils", Soils and Foundations, Vol. 27, No. 3, pp. 519~539.
18. Taylor, D.W.(1942). "Research on consolidation of clays." Series 82, MIT, Cambridge, Mass.
19. Yoshikuni H., Nishiumi H., Ikegami S. and Seto K.(1994), "The creep and effective stress-relaxation behavior on one-dimensional consolidation(in Japanese)." 29th Japan National Conf. on Soil Mechanics and Found. Engrg., Vol. 29, pp. 269-270.
20. Yoshikuni H., Nishiumi H., Ikegami S. and Seto k.(1994), The creep and effective stress relaxation behavior on one-dimentional consolidation (in japanese), 29th Japan National Conf. on soil Mechanics and Found.Engrg., Vol29, pp.269-270
21. Wissa, A.E.Z., Christian, J.T., Davis, E.H. and Heilberg, S.(1971), Consolidation at Constant Rate of Strain, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol 97, No. SM10, pp.1393~1413