

Large Calibration Chamber의 개발 Development of Large Calibration Chamber System

정충열¹⁾ · 김태준²⁾ · 김대규³⁾ · 이우진⁴⁾

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 석사과정 Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정 Ph. D. Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

³⁾ 상명대학교 토목환경공학부 전임강사 Instructor, Dept. of Civil Engrg., SangMyung Univ.

⁴⁾ 고려대학교 토목환경공학과 부교수 Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

Synopsis : Laboratory calibration chamber tests for cone penetrometers, pressuremeters and dilatometers in cohesionless soil specimens have been conducted by numerous researchers. However, there have been only few applications to compacted or preconsolidated cohesive soils. Therefore, for the first time, Calibration Chamber System was developed in Korea University. This can be attributed to the extremely time consuming and laborious process involved in the preparation of large cohesive soil specimens in addition to other complexities involving instrumentation for pore pressure monitoring and the need for maintaing saturation by back pressure. Chamber System with similar principle as LSU Chamber System was made of more strengthen and complementary form by increasing system diameter(1.2m), carrying out 1st and 2nd consolidation process in one system for smooth and safe work, accurate Data Aquisition.

Key words : Slurry consolidation, Calibration chamber, Double wall, Excess Pore Water Pressure

1. 서론

현장시험 결과는 현장에서 발생하는 여러 요소의 복합적 영향을 받으므로 각 요소의 영향을 고려한 정확한 결과해석 및 적용은 상당히 어려운 것으로 알려져 있다. 현장에서 발생하는 여러 요소들의 영향을 명백히 파악할 수 있다면, 현장 시험의 이점을 유지하면서 보다 정확한 결과해석 및 지반의 특성 파악이 가능해진다. 이와같은 목적으로 제안된 방법이 첨단 대형 Calibration Chamber System이며, 현장에서 발생 가능한 요소가 시험결과에 미치는 영향을 연구할 수 있는 방법이다. 이를 통해 현장시험 결과를 강도정수 또는 기본 물성치 등 지반공학적 특성치와 연결지을 수 있다.

첨단 대형 Calibration Chamber System은 현장시험과 실내시험의 단점을 모두 극복한 지반조사기술 발전에 필수적인 핵심기술로 인정받고 있다. 선진국에서는 Calibration Chamber System의 중요성을 인식하여 관련 연구가 지속적으로 수행되고 있으나 우리나라에서는 이에 대한 연구가 미진한 상태로, 경험적이고 이론적인 연구에 치우쳐 있어 현장시험의 수행, 결과해석시 대부분 외국의 기준 및 이론을 그대로 사용하고 있는 실정이다. 따라서 Calibration Chamber System을 활용하여, 우리실정에 맞는 현장 시험기술을 개발, 정립, 실용화하는 것은 경제적이고 안정적인 건설을 위해 필수적이라고 할 수 있다.

2. KU(Korea University) Calibration Chamber System

Calibration Chamber System은 homogeneous한 시료를 가지고 우리가 원하는 응력이력(stress history)과 경계조건(boundary condition)에서 연속적으로 실험을 할 수 있는데, 이 Calibration Chamber System은 크게 Slurry Cosolidometer와 Calibration Chamber로 구성되어 있다. Slurry Cosolidometer는 Slurry 상태의 시료를 자립할 수 있을 때까지 압밀(1차 압밀)시키는 장치이며, 이 때 Slurry 시료는 분말상태의 점토(kaolinite)와 모래를 일정 비율로 배합하여 조성한다. Calibration Chamber는 1차 압밀한 시료를 등방(isotropic) 또는 k_0 상태(anisotropic)로 압밀(2차 압밀)시키는 장치이며, 특히 2차 압밀단계중 하나인 k_0 압밀을 수행하기 위해서 Double Wall 구조로 제작되었다.

2.1 System의 구성

2.1.1 Slurry Consolidometer

Consolidometer 몸체는 2개의 알루미늄 튜브로 구성되어 있으며, 각각은 직경 1.2m, 높이 1m로 제작되었다. 이중 하부튜브는 두 부분으로 분리될 수 있도록 되어 있으며, 볼트로 잘 체결되어 있다. 이는 2차 압밀을 수행하기 위해 하부 튜브를 떼어 낼 때 시료의 교란이나 작업자의 실수로 인해 시료가 손상되는 것을 예방하기 위해서이다.

압밀하중은 유압 펌프에 의해 피스톤 로드에게 가해지며, 이는 자동 압력 조절 장치에 의해 일정한 압력을 유지해 줄 수 있도록 되어 있다.

2.1.2 Calibration Chamber

Calibration Chamber는 Piston Cell 부분과 Double Chamber Cell 부분으로 구성되어 있다.

Piston Cell 부분에서는 시료에 2차 압밀 하중을 가하게 되는데, 피스톤 실린더에 채워진 물을 통해 Base Plate를 위로 올려주게 된다.

Double Chamber Cell 은 k_0 조건을 유지하는 부분이며, 수직 압력이 시료에 가해지면 Inner Cell에서 압력을 받고 그 압력이 Cell 사이에 채워진 물을 통해 센서에 전달되며, k_0 상태를 유지하기 위해 Cell의 변형을 감지하여 수평압을 가하게 된다.

Calibration Chamber는 4가지의 다른 응력, 변형률 조건을 모사할 수 있다.

경계조건 1 : 종방향 응력 일정, 횡방향 응력 일정

경계조건 2 : 종방향 변형 Zero, 횡방향 변형 Zero

경계조건 3 : 종방향 응력 일정, 횡방향 변형 Zero

경계조건 4 : 종방향 변형 Zero, 횡방향 응력 일정

2.2 System의 특징

점토를 이용한 Calibration Chamber 시험의 경우 압밀에 소요되는 시간이 모래를 이용한 시험보다 매우 긴 시간이 소요되므로, KU Calibration Chamber System의 경우 한번 조성된 시료로부터 더 많은 자료를 얻기 위하여 시료의 크기를 직경 1.2m 높이 1.0m로 대형화하였다. 직경 대 높이비의 증가는 압밀 시간과 boundary effect의 영향을 최소화시킬 수 있는 이점이 있다. 그리고 기존의 LSU Chamber 경우 1차 압밀 완료 후 자립된 시료를 Piston위로 옮겨 2차 압밀을 수행할 시, 시료 이동 중 시료가 교란되거나 손실될 위험이 있었으나, KU Calibration Chamber System은 1차 압밀과 2차 압밀이 시료의 이동 없이 모두 하나의 Piston위에서 수행될 수 있도록 하부 Piston부를 수정하였다. 또한, 기존의 Double Wall구조는 Inner Cell과 Outer Cell이 서로 분리되어 있어 장비의 대형화로 인한 중량의 증가로 Cell의

이동이 용이하지 않을 뿐만 아니라, 상당히 위험하였으므로 이런 문제점을 고려하여 Inner Cell과 Outer Cell의 양 끝단을 일체화 시켜 본래의 기능을 수행함과 동시에 Double Wall의 이동을 용이하게 하였다. Slurry Consolidometer와 Calibration Chamber의 도면과 사진은 그림 2-1, 2-2, 2-3, 2-4 와 같다.

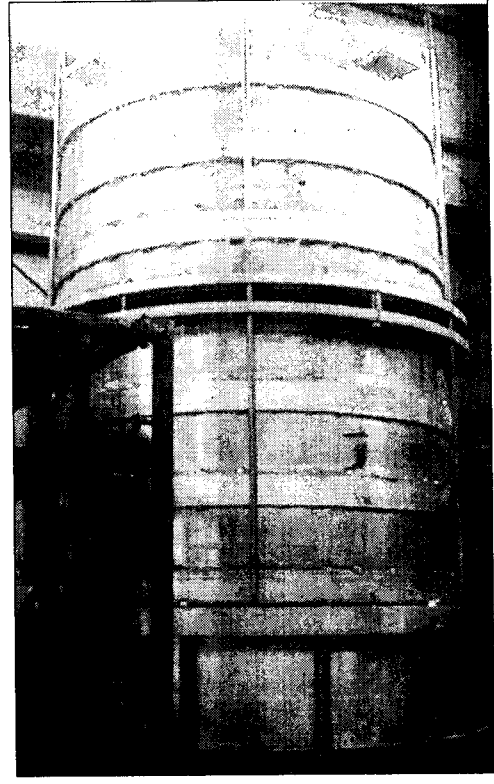
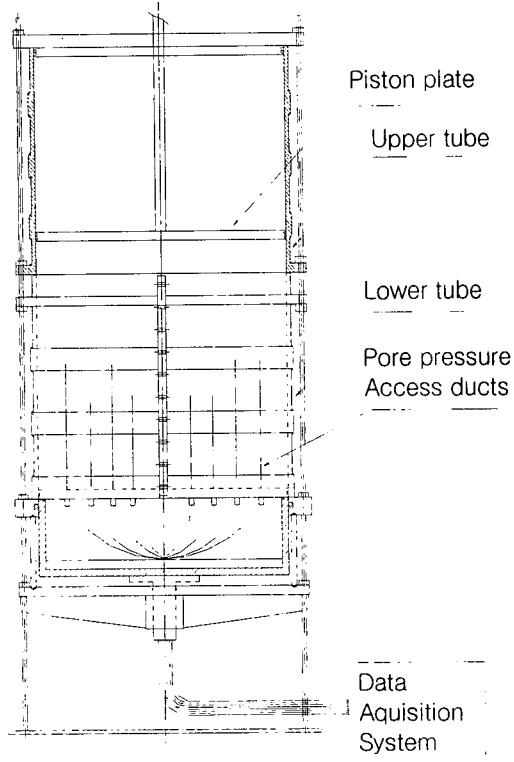


그림 2-1. Slurry Consolidometer(도면)

그림 2-2. Slurry Consolidometer(사진)

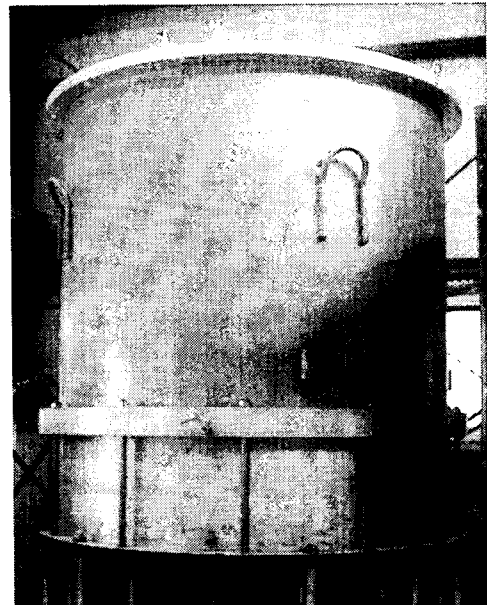
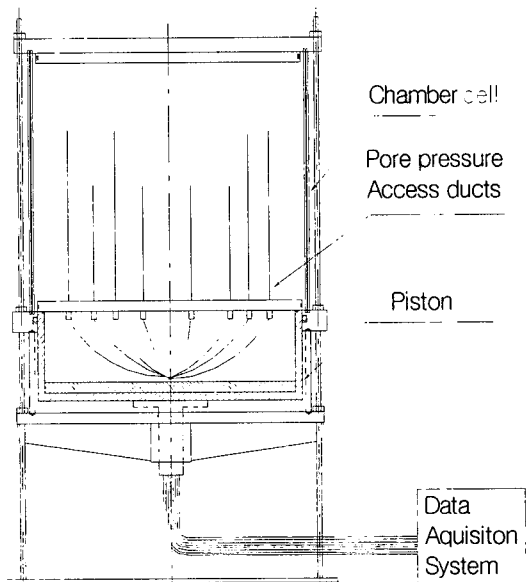


그림 2-3. Calibration Chamber(도면)

그림 2-4. Calibration Chamber(사진)

3. KU Calibration Chamber 시험 과정

시험 과정은 크게 시료 준비 단계와 콘 관입 단계로 구분할 수 있으며, 시료 준비 단계는 Cosolidometer에서의 Slurry Consolidation(1차 압밀)단계와 Calibration Chamber에서 Reconsolidation(2차 압밀)단계로 나뉘어진다. 그리고 각 단계에서 간극 수압, 압밀 압력, 압밀량 등은 여러 장비에 의해 항상 모니터링 된다.

3.1 시료 준비 단계

본 연구의 경우 Slurry 상태의 시료를 사용하여 압밀시험을 행하는데, 이 방법은 현장 시험시 문제가 되는 지중 응력의 크기, 응력 이력등을 제어할 수 있으며, 전체적으로 균질한 시료를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그리고 1차 압밀과 2차 압밀 두 단계로 나누어 압밀을 수행하는 기술은 양질의 균질한 점토 시료를 얻을 수 있게 해준다고 알려져 있다. (Krizek and Sheeran, 1970; Huang, et al., 1988). Calibration chamber는 삼축 응력을 줄 수 있도록 설계되어 있어 시험자가 원하는 응력 상태의 시료를 얻을 수 있으며, 1차 압밀 동안 발생한 Rigid boundary effect를 Double wall flexible system에 의한 2차 압밀 과정에서 감소시킬 수 있다. 또한, 첨단 컴퓨터 조절 시스템 및 대형 시험장비를 사용하여 보다 현장과 비슷한 조건을 재현할 수 있으며, 새로운 현장시험 방법의 개발 및 검증이 가능하다.

3.1.1 Slurry Consolidation

Slurry 압밀은 다음의 과정을 통하여 이루어진다.

1. 모래와 점토 분말을 일정 비율(67%:33%)로 혼합하고, 이 혼합 시료와 그 시료의 액성한계 2배에 해당하는 De-ionized water를 mixing drum에 넣고 mixing한다. mixing drum은 상하 3개의 회전 날을 가지고 있으며, 상부에 suction을 가하여 mixing 과정에서 발생하는 공기를 제거한다.
2. Mixing은 slurry가 완전히 부드러워지고, lump가 형성되지 않을 때까지 약 30~40분간 지속한다.
3. Mixing이 끝난 후, Slurry를 Consolidometer 안에 붓기 전에 16개의 Pore pressure transducer를 Base Plate에 설치한다. Transducer는 높이가 다른 두 위치에 8개씩, Consolidometer 중심으로부터 반경을 달리 하여 설치하며, Transducer의 위치는 공동확장이론(Cavity Expansion theory)에 의하여 결정된다.
4. Slurry 안에 공기가 함유되지 않도록 약 50mm의 튜브를 이용하여 Consolidometer 바닥에서부터 Slurry를 넣는다.
5. Slurry에 수직 압밀 압력을 가하는데 이 때 수직 압밀 압력은 시료가 자립할 수 있을 정도의 크기로 한다. 이 압밀 압력은 Miniature Consolidometer를 통하여 혼합된 시료의 강도특성을 파악한 후 구한다. 1차 압밀의 완료 시점은 Pore pressure transducer에서 측정된 과잉간극수압이 모두 소산되는 때로 한다.

3.1.2 Reconsolidation in a Calibration Chamber

Slurry Consolidation과 Reconsolidation을 모두 Piston위에서 수행할 수 있도록 Piston부를 수정하였기 때문에 시료의 이동 과정이 없으며, 1차 압밀 완료후 Slurry Consolidometer(Aluminum Tube)를 제거하고 자립된 시료에 Calibration Chamber(Double Wall)를 설치하여 2차 압밀을 수행한다. Aluminum Tube를 제거하고 Double Wall을 설치 할 때, 자립된 시료는 구속이 없어 약간의 진동에 의해서도 쉽게 bulging이나 liquefaction을 일으킬 수 있기 때문에 시료가 손실되지 않도록 매우 주의해야 한다. 2차 압밀은 Isotropic Consolidation과 Anisotropic(k_0) Consolidation으로 구분된다.

Isotropic Consolidation은 일반적인 삼축 시험과 매우 유사하며 그 과정은 다음과 같다.

1. 시료에 isotropic stress와 back pressure를 가한다. 보통 압력은 10단계에 걸쳐 가해지며 back pressure가 isotropic stress보다 커서는 안 된다.
2. 위 첫 번째 단계가 진행되는 동안 B value를 체크한다.
3. Isotropic stress를 1차 압밀(slurry consolidation) 압력 보다 커질 때까지 가한다.
4. B value를 체크하여 시료가 완전히 포화되었으면 back pressure line을 잠그고 일정하게 유지 시킨다. Isotropic stress는 effective isotropic stress(isotropic stress-back pressure)가 effective slurry consolidation pressure보다 커질 때까지 증가시킨다.
5. Isotropic stress가 최종 2차 압밀 압력에 도달했을 때 back pressure line을 열고 물을 배수 시킨다.

Anisotropic(k_0) Consolidation은 다음 과정을 통해 이루어지며 이 과정 전에 시료는 반드시 포화되어 있어야 하며 시험의 전 단계는 Isotropic Consolidation과 같다.

1. Back pressure line을 닫는다.
2. Inner cell과 outer cell사이의 연결 라인을 열고 back pressure+effective consolidation pressure의 압력을 동시에 가한다.
3. 1-2일 동안 이상태를 유지한다.
4. Anisotropic(k_0) consolidation동안 시료에 수평 변위가 발생하지 않도록 inner cell과 outer cell의 압력이 상호간에 자동으로 조절되게하기 위하여 supplying inner cell pressure line을 닫고 inner cell과 outer cell 사이의 연결 라인을 닫는다. 이 때 자동조절은 Electro-pneumatic control system에 의하여 제어된다.
5. Back pressure line을 열고 back pressure line을 통해 배수가 일어나도록 한다.
6. 이 과정 동안 시료의 축방향 변위와 inner cell pressure response를 모니터링하고, back pressure chamber의 수위변화를 관찰해 시료의 파괴 변화를 체크하며, 시료내 간극수압의 변화는 pore pressure transducer에 의해 모니터링 된다. 그리고 위의 작업이 진행되는 동안 inner cell pressure를 체크해 inner cell과 outer cell의 압력이 항상 같도록 유지시킨다.
7. 초기에 lateral pressure는 감소하지만, 감소 비율이 점점 작아져 마침내 k_0 상태의 일정한 수준에 이르게 된다. 만일 lateral pressure가 계속 감소한다면 chamber system에서 누수가 되는지 확인해야 한다.
8. Pore pressure transducer의 압력이 back pressure 와 같아지면 primary consolidation이 완료된다.
9. Overconsolidation 시료는 8번 단계까지 완료한 후 vertical stress를 감소시켜 만들어질 수 있다.

3.2 Piezocone Penetration Test

Calibration Chamber에서의 2차 압밀이 완료되면 Control Panel을 이용하여 시료에 원하는 경계조건을 적용시키면서 피에조콘 관입시험을 실시한다. 피에조콘 관입시험은 Calibration Chamber위에 설치된 관입추진장치를 이용하여 실시하며 이때 원하는 관입속도를 재현할 수 있다.

피에조콘 관입시험 시에는 현장 피에조콘 관입시험과 같은 시험결과인 콘 저항치, 간극수압, 주면마찰을 깊이에 따라 연속적으로 측정하고 이어서 실시하는 소산시험 시에는 간극수압의 시간적 변화를 측정한다. 이때 시료 준비 시부터 시료 안에 설치되어 있는 간극수압 측정장치를 이용하여 피에조콘에서 측정되는 간극수압 뿐만 아니라 시료내부의 기지의 위치에서의 간극수압이 피에조콘 관입 및 소산시험 시에 각 어떻게 변화하는지 측정할 수 있다. 이러한 시험결과들을 이용하여 지반의 공학적 특성을 규명하게 된다.

3.3 Data Aquisition system

본 연구를 위해 시험 가동중인 장비의 Data Aquisition System은 LABVIEW라는 최신 S/W를 사용하여, 각 시험단계마다 시료에 가해지는 압력, 압밀량, 간극수압 등을 실시간으로 체크해 볼 수 있도록 제작되어 있어 결과측정치의 신뢰성과 다양성 및 융통성을 향상시켰다.

4. 결론

현재 Control Panel을 제외한 모든 Consolidation System이 제작 완료되었으며, Slurry 상태의 시료를 조성하여 1차 압밀 실험을 진행하고 있다. 그리고 본 연구를 통해 얻어진 성과는 다음과 같다.

- 1) Slurry 배합에 필요한 점토(kaoline)와 모래(sand)의 비율결정과 시료자립을 위한 1차 압밀압력을 결정하였다.
- 2) Slurry Consolidometer와 Calibration Chamber는 시험의 안전과 효율을 최대한 고려하여 설계하였으며, 정확한 k_0 상태를 구현하기 위해 양 끝단을 결합시킨 일체형 Double Wall구조로 설계 제작되었다. 그리고 시료의 이동 없이 1차 압밀과 2차 압밀이 한 곳에서 수행될 수 있도록 Piston부를 수정하였다.
- 3) Calibration Chamber System을 제어하기 위한 Control Panel의 설계가 진행되고 있으며, 자동적인 k_0 압밀을 구현하기 위해 Electro pneumatic control system을 채택하였다.

향후 Calibration Chamber System 개발이 완료되고 난 후 콘 관입 메커니즘의 규명, 콘 관입에 의한 간극수압 분포 형상에 대한 연구와 함께, 동일 시료에 대한 Dilatometer나 Pressuremeter의 관입 거동 메커니즘 규명 등 활발한 연구가 이루어질 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 2000년 목적기초연구지원사업(과제번호 : 2000-2-31100-006-3)에 의해 이루어진 것으로 이에 한국재단에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Huang, A. B., Holtz, R. D. and Chameau, J. L., 1988, "A Calibration Chamber for Cohesive Soils," ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 11, No.1, pp.30-35.
2. Krizek, R. J. and Sheeran, D. E., 1970, "Slurry Preparation and Characteristics of Samples Consolidated in Slurry Consolidometer," Technical Report No. 2, Contract No.DACW39-70-C-0053, U.S. Army Corps of Engineer, Water ways Experiment Station, Vicksburg, MS,pp.1-5.
3. Lim, B., (1999), "Determination of Consolidation Characteristics in Fine Grained Soils Evaluated by Piezocone Tests," Ph.D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Baton Rouge, LA
4. Vesic, A. S., 1972, " Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass," Journal of Soil Mechanics, Foundation Div., ASCE, Vol.98, No. SM3, pp. 265-290