

침투압을 이용한 급속압밀시험 : 방법 및 검증

Fast Consolidation Test Using Seepage Forces : Method and Validation

이 강 일¹ Lee, Kang-Il
김 태 형² Kim, Tae-Hyung
도브로슬리브 지니다르찌스³ Dobroslav Znidarcic

Abstract

A continuous, fast, and convenient experimental method, replacing recent tests such as standard oedometer or self weight consolidation test, is needed for the determination of the consolidation behavior of unformed soft soils. This study introduced the seepage induced fast consolidation test using the flow pump technique. It can obtain the consolidation characteristics of unformed soft soils conveniently and fast. The seepage induced consolidation test apparatus consists of a modified triaxial cell, differential pressure transducer, flow pump, and displacement transducer. The test continuously proceeds with starting seepage forces induced consolidation, loading consolidation, and permeability test on the same sample. In addition, this test result was compared with the standard oedometer test result to make this method valid. From this study it was found that this method is a convenient and time saving effective method for obtaining data required for calculation of consolidation settlement of unformed soft soils.

요 지

최근의 압밀시험(표준압밀시험 또는 자중압밀시험)을 대신하여 성형되는 얇은(또는 성형이 불가능한 상태의) 연약한 흙의 압밀거동을 연속적으로 빠르고 편리하게 결정할 수 있는 실험방법이 요구된다. 그래서 본 연구에서는 이와 같은 흙의 압밀 거동을 플로우 펌프에서 발생된 침투압을 이용하여 연속적으로 빠르게 획득할 수 있는 급속압밀실험을 제안하였다. 실험 장치는 삼축셀, 플로우 펌프, 변환기, 데이터처리장치 등으로 구성되고, 실험의 과정은 동일 시료에 대해 침투압에 의한 압밀, 하중재하에 의한 압밀, 압밀 후 투수시험 순으로 연속적으로 진행된다. 또한 본 실험법의 검증을 위해 기존의 표준압밀시험으로부터 얻은 결과와 비교 검토도 이루어졌다. 연구 결과 급속압밀실험법이 연약한 흙의 압밀 침하량 산정에 필요한 데이터를 쉽고 빠르게 산정할 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

Keywords : Consolidation, Fast consolidation test, Flow pump, Oedometer, Seepage forces

1. 서 론

슬러리 상태의 연약한 흙(예를 들면, 폐광미, 준설토

등)을 다루는 것은 지반공학 분야에서 가장 흥미 있는 문제 중 하나이다(Krizk, 2004). 연약한 성질의 흙은 비선형적 특징을 가지고 있기 때문에 현장에서 거동을

1 정회원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Depart. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

2 정회원, 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assis. Prof., Division of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신저자)

3 Prof., Department of Civil Engrg., Univ. of Colorado at Boulder

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

예측하는데 있어서 주의가 필요하며 복잡한 실험 및 수치해석들을 요구한다. 슬러리 상태의 준설투기토의 압축과정을 살펴보면 그림 1과 같이 침전, 압밀, 건조과정을 거치는 3 단계로 나누어진다. 준설투기토는 초기에 침전과정을 통해 흙 입자간 결합이 형성된다(Kynch's, 1952; Monte and Krizek, 1976; Liu and Znidarcic, 1991; You, 1993; 이범준 등, 2007). 이 상태부터 흙은 유효응력 원리가 적용된다. 일단 침전에 의해 흙 입자가 결합되면 간극수가 빠져나가는 압밀과정이 진행된다. 압밀은 흙 입자 자중이나 외부 작용 하중에 의해 진행된다(McNabb, 1960; Gibson et al., 1967, Liu and Znidarcic, 1991; 김형주, 오근엽, 1999). 일단 흙의 상부 표면으로부터 물이 없어지면 입자간 간극속의 물은 증발 작용하고 지층 아래 부분으로의 배수에 의해 물이 없어지는 건조작용이 진행된다. 증발에 의한 건조작용은 증발이 끝날 때 까지 또는 수축한계에 다다를 때 까지 계속된다. 건조과정에서 흙은 균열이 발생하며 이는 점점 건조과정중에 더 발달하게 되며(Abu-Hejleh, 1993; Abu-Hujleh and Znidarcic, 1995; Yao et al., 2002) 균열의 정도는 흙의 특성과 기후에 따라 결정된다.

준설투기토의 침하과정 중 특히 흙의 자중과 외부하중에 의한 압밀과정에서 준설투기토는 비선형 거동을 보여 기존의 Terzaghi 압밀 이론으로는 예측이 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 하지만 연약점토의 연구에 있어 한 가지 흥미로운 사실은 오늘날뿐만 아니라 Terzaghi가 압밀 이론을 제시한 이후 90여 년 동안 선형압밀이론을 여전히 지반공학 분야에서 주로 사용하고 있다는 것이다. 이 이론이 흙의 침하량을 산정하는데 이용되면서 대체적으로 비선형 거동 특성을 가진 연약한 준설투기토를 다루는 데는 적합하지 않음이 밝혀졌지만 여전히 사용이 되고 있는 실정이다. Terzaghi의 일반적 압밀이론의 비적합성이 인식되어 좀 더 정밀한 이론이 Gibson에 의해 1967년 새로운 이론이 만들어졌지만(Gibson et al., 1967, 1981), 이 이론의 현장 적용에는 시간이 필요했는데 이는 적합한 수치해석방법 개발과 개발된 프로그램의 실행 그리고 무엇보다도 수치해석에 필요한 비선형 흙의 특성 값을 획득할 수 있는 실험방법의 개발 등이 필요했기 때문이었다. 1980년 중반 이후부터 연약한 준설투기

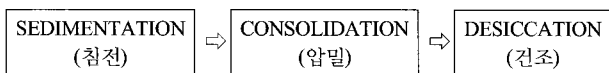


그림 1. 준설투된 연약 투기토의 압축 과정

토의 압밀거동을 분석할 수 있는 수치해석 방법과 실험 방법이 개발되어 사용이 되고 있다. 하지만 여전히 비선형 거동을 보이는 흙의 압밀을 정확히 예측하는데 가장 중요한 변수 값을 획득하는 실험 연구에 있어서는 아직까지 그 정확도에 있어 논란이 거듭되고 있는 실정이다.

그래서 본 논문에서는 비선형 거동을 보이는 준설투기토와 같은 연약한 흙의 압밀 거동을 예측하는데 필요한 변수 값을 빠르고 정확하게 획득할 수 있는 침투압(seepage forces)을 이용한 급속압밀실험 방법에 대해 고찰하였다. 구체적으로 급속압밀시험의 기계장치, 실험 절차 그리고 카이올린 점토시료에 대해 실시된 실험 결과를 제시하였다. 또한 본 실험법의 검증을 위해 급속압밀시험 결과와 표준압밀시험 결과가 비교되었다.

2. 실험장치

플로우 펌프기법을 이용한 급속압밀시험은 삼축시험장치를 개량한 것으로 주요 장치로는 삼축셀(triaxial cell),

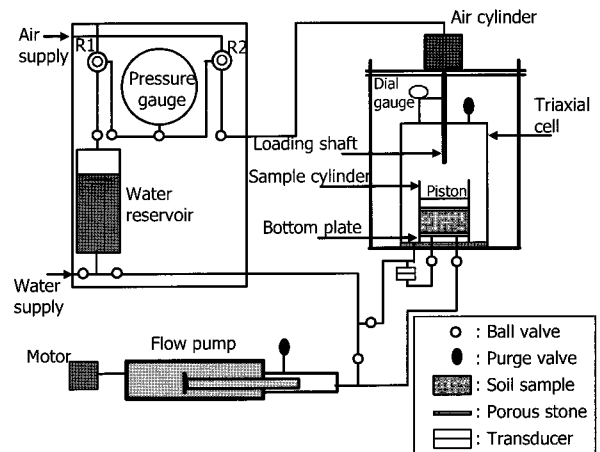


그림 2. 급속압밀시험장치 모식도

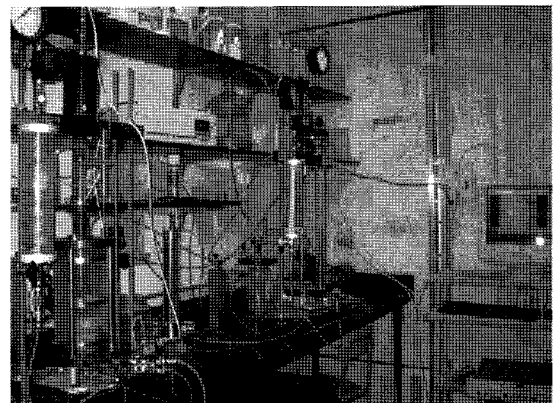


그림 3. 급속압밀시험장치 전체 전경

플로우 펌프(flow pump), 변환기(transducer), 다공석(porous stone), 데이터처리장치 등이 있으며 상세 내용은 다음과 같다(그림 2, 그림 3).

2.1 삼축셀

삼축셀은 기존의 삼축 셀을 변형하여 사용하는데, 삼축셀 내부는 그림 2 및 그림 4(c)와 같이 플로우 펌프기법을 이용한 급속압밀시험을 위하여 높이 15.2cm, 직경 7.6cm용 투명 아크릴로 샘플 실린더가 필요하다. 하부 판은 그림 4(d)와 같이 흙 시료를 고정하고 펌프 작동에 따른 물 흐름을 원활히 해주기 위해서 원형 홈을 만들었으며 직경은 시료의 직경(7.6cm)과 같다. 상부 피스톤은 그림 4(e)와 같이 하중을 전달하고 상부로의 원활한 배수 및 시험의 불확실성을 최소화하기 위해서 높이가 4.6cm인 피스톤을 제작하였다. 이 상부 피스톤 면에는 배수를 위해 직경이 0.6cm인 홈을 18개 만들었다.

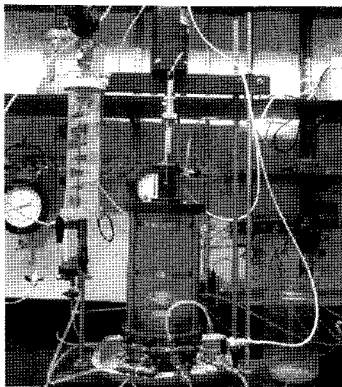
2.2 플로우 펌프

플로우 펌프는 크게 전동 부분과 실린더 부분으로 나

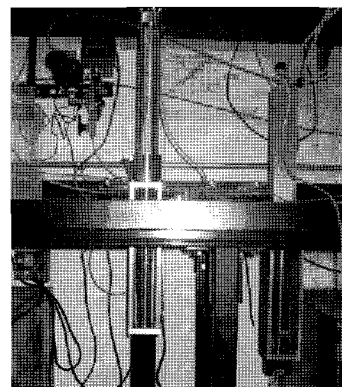
뉘진다. 전동 부분은 single syringe infusion-withdrawal pump로서 펌프의 속도와 방향을 실험에 맞게 조절할 수 있다. 펌프의 유량(flow rate) 범위는 $2.90 \times 10^{-2} \text{mm}^3/\text{sec}$ 에서 $1.34 \times 10^2 \text{mm}^3/\text{sec}$ 이며 측정대상 포화도에 따라 펌프의 속도를 조절할 수 있다. 펌프 실린더 부분의 전체길이는 228.6mm이며 직경은 12.7mm이다. 이 플로우 펌프는 연속적이고 안정적인 물 흐름을 제공해준다(그림 4(b)).

2.3 변환기

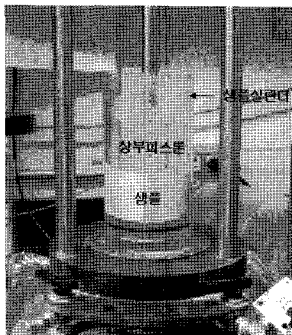
간극수압의 변화를 측정하기 위해서 압력차이 변환기(differential pressure transducer)가 사용되었다. 변환기 내부에 설치되어져 있는 diaphragm(membrane)이 변환기 양쪽에 전해진 압력차를 전기적 신호로 변환시켜 준다. 변환기는 흙 공시체의 하부에 연결되어져 있어 압밀시험동안 침투로 유발된 압력 차이를 측정한다. 변위는 파장이 600~710nm인 Dynavision의 레이저 변위계를 설치하여 계측하였으며 부수적으로 LVDT를 컴퓨터에 연결하여 자동 계측되도록 하였다(그림 5).



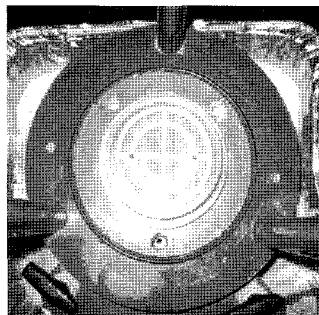
(a) 삼축셀



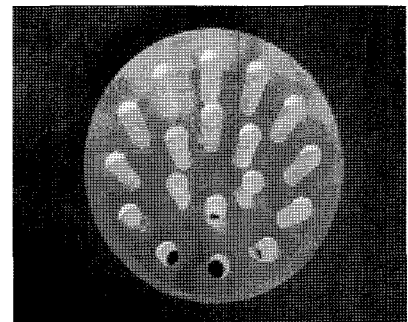
(b) 플로우 펌프



(c) 샘플실린더

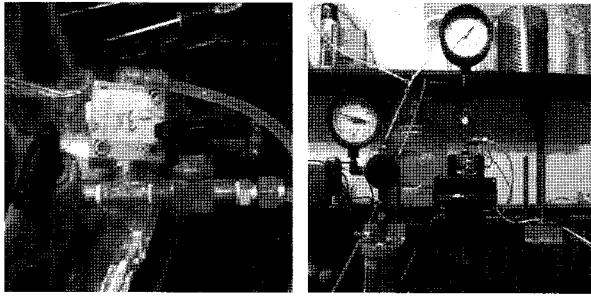


(d) 하부 판



(e) 상부 피스톤

그림 4. 급속압밀시험장치



(a) 간극수압장치 (b) 레이저 변위계

그림 5. 변환기 장치

2.4 다공석

다공석은 흙 공시체의 상부와 하부에 설치하였다. 다공석은 물의 흐름은 허용하되 흙 입자 및 부유물질의 이동은 제한 한다. 본 실험에 사용된 다공석은 두께가 3mm이고 재질은 플라스틱이다.

3. 실험절차

급속압밀시험의 주요 실험절차는 시료 및 장치 준비, 플로우펌프작동에 의해 발생된 침투압에 의한 압밀, 하중재하에 의한 압밀, 압밀 후 투수계수 측정 순으로 4단계에 걸쳐 진행된다(그림 6).

3.1 시료 및 실험장치 준비

현장에서 반입한 시료는 현장 함수비상태로 시료를 완전히 교반하여 섞는다. 실내에서 임의로 준비한 시료의 경우는 함수비가 약 200~400%가 되도록 시료를 용기에 담고 물과 함께 완전히 교반하여 섞는다. 큰 함수비를 사용하는 목적은 시료의 완전 교반과 공시체 세팅을 원활하게 하기 위함이다.

실험장치 준비에 있어 가장 중요한 것은 연결관 내의

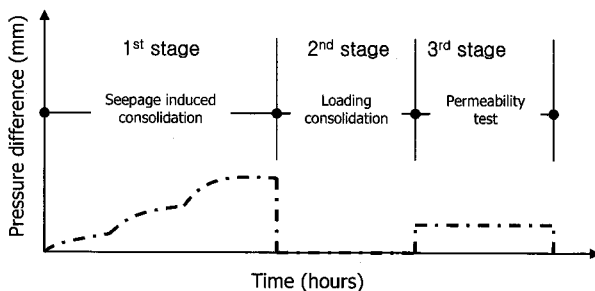


그림 6. 시료 및 실험장치 준비 후 급속압밀시험의 단계

공기를 모두 제거하는 것이다. 모든 시험장치의 밸브를 개방하여 물을 통과시켜 관내 공기를 완전히 제거한다. 공기 제거 시 소형노즐 연결관은 손으로 툭툭 치면 쉽게 공기를 제거할 수 있다. 특히 간극수압 측정장치의 공기 제거는 상, 하부 2곳의 나사를 풀어서 완전히 제거한다. 공기제거가 끝나면 준비된 다공석과 여과지를 고무링이 부착된 하부 판 바닥에 깔고 샘플실린더를 집어넣는다. 여과지는 물을 흡수하면 팽창되는 현상이 있어 물에 미리 적신 후 샘플실린더 크기로 잘라서 사용한다. 종이 여과지는 시료와 다공석 사이에 위치하여 미세 시료입자가 다공석으로의 침투를 방지하는 역할을 하며 다공석을 설치시는 매끈한 면이 종이 여과지와 접하도록 하여 마찰의 영향을 최대한 줄인다. 다음으로 실린더 관에 물을 약간 채워 다공석과 여과지에 남아 있는 잔류공기를 제거한다.

다음 단계는 시료 투입단계로서 준비된 시료를 다시 한 번 교반한 후 슬러리 상태의 시료를 샘플실린더 안에 조심스럽게 4~5cm정도 부어 넣는다(그림 7 참조). 시료 투입 후 플로우 펌프의 상부밸브를 개방하여 실린더 안으로 물을 넣으면서 주변 흙 및 상부공기, 부유물질 등을 피펫으로 제거하고 일정량 물을 더 넣어 시료를 안정화 시킨다. 이 과정 후 시료의 초기높이를 측정하여 준비된 용지에 기록한다. 그 다음으로 준비된 상부 쪽 다공석과 여과지를 샘플실린더 안으로 떨어뜨린다. 이때 다공석의 수평상태가 잘 유지되어야 하므로 세심한 주의가 요구된다. 구멍이 뚫린 상부피스톤을 집게로 집어서 샘플실린더 안으로 넣고 공기 제거 및 팽창상태가 유지되도록 조심히 돌린다. 여기서 상부피스톤은 초기에 시료상부에 0.07kPa의 압력을 주는 역할을 겸하여 시료의 안정화를 가속시키고, 침투압을 이용한 압밀실

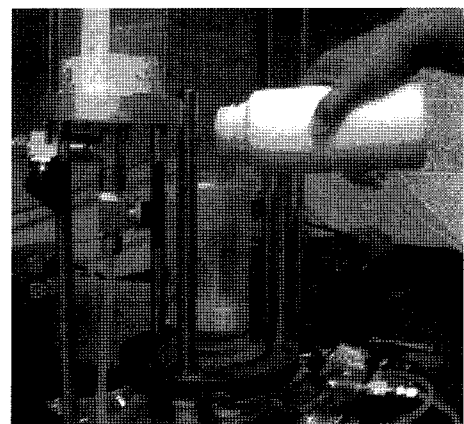


그림 7. 슬러리 상태 카이올린 점토시료의 투입 모습

협동안 시료내의 흐름 통로의 발생을 방지하는 역할을 한다. 다음은 삼축셀을 조립하고 상부의 밸브를 열어 셀 속에 물을 가득 채운 후 상부 밸브를 잠근다.

재하장치는 베어링 볼을 축 장치 위에 올려놓고 축을 맞추어 축이 움직이지 않도록 조여 놓는다. 초기 구속압은 컴퓨터 화면상에 있는 압력 부분의 변화를 보면서 구속압을 200kPa까지 천천히 올린다. 이때 화면상의 압력 부분에 변화폭이 크면 문제가 있는 것으로 실험 장치를 다시 한 번 점검한다. 간극수압 장치 및 상부 물 공급 장치 만 잠그고 나머지 모든 밸브가 오픈 되어 있는지 점검한다.

3.2 플로우 펌프 작동에 의한 자중압밀 단계

플로우 펌프 작동 전 시료와 시험 장치를 완전히 셋팅 시킨 후 약 2~5시간을 그대로 방치한다. 이것은 시료의 함수비가 매우 높고 완전 교란상태이므로 시료의 안정화를 위해 필요한 최소한의 시간이며 시료에 따라서 시간은 약간 다르게 적용된다. 시료가 안정화 된 후 플로우 펌프를 작동시키는데 이 플로우 펌프의 기능은 흡입력을 발생시켜 시료 내부에 연속적이고 안정적인 물 흐름을 제공해주는 역할을 담당한다. 펌프 속도는 한번에 작용시키지 않고 약 3회 정도 나누어 증가시킨다. 첫 번째 펌프속도는 시료에 따라 다르지만 시료의 초기 반응상태를 점검하기 위해 대략 0.000288cm/sec 정도를 주고 시작한다. 다음은 첫 번째 펌프속도에 대응되는 변위상태를 점검 한 후 그 변화량이 크지 않다면 초기 속도 값의 약 2배 정도의 속도를 올린다. 이 단계가 초기 안정화 단계로 이후에는 2회 내지 3회 정도 속도를 나누어서 올린다. 각 단계별 속도 증감은 5배 이상을 초과하지 않도록 한다. 자중압밀은 시작 단계부터 최종 단계까지 모니터링을 통해 최소한 1볼트 이상 차이가 발생될 때까지 진행한다. 측정 값 1볼트 이상의 의미는 침투압을 통한 자중압밀이 이루어졌음을 의미한다. 이 단계는 시료에 따라 보통 1~2일 정도 소요가 되는데 특히 입도 구성 분포가 다양한 경우 입자 분리 문제로 더 많은 시간이 소요될 수 있다. 본 단계가 마무리되면 침투압에 의한 압밀이 완료되고 하중재하 압밀 단계로 넘어간다.

3.3 하중재하에 의한 압밀 단계

하중단계에서 제일 중요한 것은 초기 단계로 축 하중

장치가 상부 피스톤에 잘 접촉하도록 컴퓨터 화면상에 있는 변위 변화폭을 확인한 후 하중을 재하 한다. 하중은 보편적으로 3단계로 나누어서 재하하며 다음단계 하중은 침하곡선을 보면서 침하 종료시점을 확인 후 하중을 올린다. 또한 하중은 점진적으로 증가시키는데 이것은 상부피스톤과 샘플실린더 사이의 공간으로 시료의 유출을 방지하기 위해서이다. 유출된 시료는 피스톤 측면에 추가적인 마찰력을 발생시켜 시료에 전달되는 하중을 감소시킬 우려가 있으므로 주의가 필요하다. 본 단계는 보통 1일이 소요된다.

3.4 압밀 후 플로우 펌프 작동에 의한 투수계수 측정단계

압밀이 종료되면 다음단계로는 투수시험 단계로서 이 시험도 플로우 펌프를 사용하여 시험을 실시한다. 투수 시험에서 펌프속도는 자중압밀 단계에서 사용된 최종 펌프속도 보다 10^{-1} 정도 속도를 낮추어 진행한다. 다만 투수시험 시 압력변화량의 변화가 화면상에 나타나는데 이때 노이즈 량이 실제 변화량 보다 크면 시험에 문제가 있으므로 이를 고려하여 속도를 설정한다. 투수시험은 constant head test 조건에서 실시된다. 이 단계의 실험에서 낮은 동수경사가 적용되고 시료가 이미 상대적으로 높은 유효응력상태에서 압밀이 되었으므로 시료 전체에 일정한 투수계수 가정은 적절하다고 볼 수 있다. 투수계수 실험 후 시료로부터 하중을 제거한다. 본 단계는 시료의 상태에 따라 다르지만 약 5시간 정도 소요된다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험결과

투수계수 실험이 종료되면 시료로부터 하중을 제거하고 삼축셀 안의 물을 제거한 후 시료를 오븐에 건조시킨다. 건조된 흙으로부터 흙 입자 무게를 결정하고 최종 압밀 상태의 시료의 간극비를 계산한다. 급속압밀시험 결과로부터 얻은 값을 정리하면 표 1과 같다. 침투압에 의한 압밀단계, 하중재하에 의한 압밀단계, 투수시험에서 획득한 자료이다. 침투압에 의한 압밀단계에서 흙 입자의 단위중량, 유효응력이 영 일 때 간극비는 시료 투입 직 후 실험 초기의 값을 의미한다. 하중재하에 의한 압밀단계에서 간극비와 유효응력은 재하압밀 종료 후 값을 나타낸다.

표 1. SICTA 프로그램 분석에 필요한 입력 값(예, 카이올린점토)

실험단계	항 목	값	단 위
1 st stage (seepage induced consolidation)	물의 단위중량	9.81	kN/m ³
	흙 입자의 단위중량	26	kN/m ³
	초기 시료 높이	0.0292	m
	유효응력이 영일 때 간극비	3.935	
	상부 유효응력	0.07	kPa
	Darcian 속도	500E-07	m/sec
	최종 시료 높이	0.0201	m
2 nd stage (loading consolidation)	간극비	1.042	
	유효응력	107.6	kPa
3 rd stage (permeability test)	투수계수	1.18E-09	m/s

표 2. SICTA 프로그램 분석의 출력 값(예, 카이올린점토)

추정된 변수 값		
항 목	값	단 위
매개변수 A	2.55512	
매개변수 B	-0.19168	
매개변수 Z	0.10511	kPa
매개변수 C	1.02E-09	m/s
매개변수 D	3.53936	

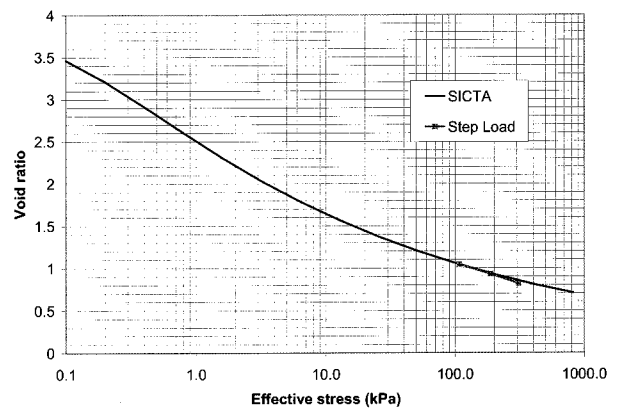
4.2 결과분석

실험결과 분석은 SICTA(Seepage Induced Consolidation Test Analysis) 프로그램을 이용하여 실시하였다. 이 프로그램에는 Abu-Hejleh와 Znidarcic(1994)가 제안한 것으로 역 해석 알고리즘이 적용되었는데 계산된 값과 실험결과 값과의 대응 관계를 반복적인 비교하여 변수를 구하도록 되어있다. 분석에 사용된 관계식은 Liu and Znidarcic(1991)가 제안한 일차원 간극비-유효응력 관계(식 (1)), 간극비-투수계수 관계(식 (2))와 자중이 고려된 Gibson et al.(1967, 1981)이 제안한 유한변형압밀이론(식 (3))이 사용된다. 식 (1)의 간극비-유효응력관계식은 기존의 압밀 분석에 사용되는 변수들(C_c , C_s , σ')과 같은 3개의 함수로 구성되며 항상 간극비 e 가 양의 값으로 표현되고 유효응력이 0일때 간극비도 정의할 수 있는 장점을 가지고 있다.

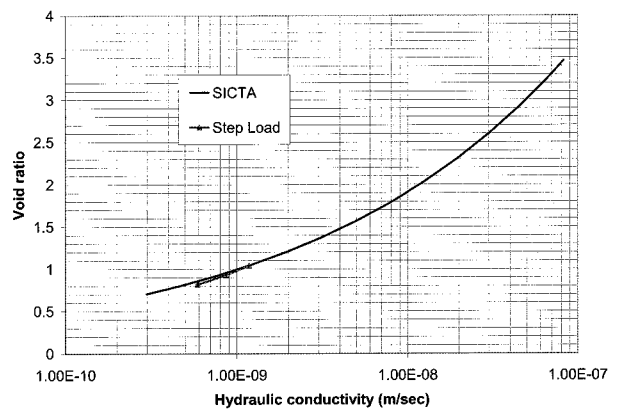
$$e = A(\sigma' + Z)^B \quad (1)$$

$$k = C e^D \quad (2)$$

$$(G_s - 1) \left[\frac{d}{d_e} \left(\frac{k}{1+e} \right) \right] \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k}{\gamma_w (1+e)} \frac{d\sigma'_v}{d e} \frac{\partial e}{\partial z} \right] = \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3)$$



(a) 간극비와 유효응력사이의 관계



(b) 간극비와 투수계수 관계

그림 8. 카이올린점토의 급속압밀시험 결과

위 세 관계식과 급속압밀시험으로부터 얻은 결과(표 1)를 사용하여 SICTA 프로그램을 운용하면 식 (1)과 식 (2)에 필요한 함수 A, B, Z, C, D가 계산되어 출력된다. 표 2는 카이올린점토에 대해 실시된 급속압밀시험 결과에 제안된 관계식을 이용하여 SICTA 프로그램으로부터 얻은 결과로 카이올린점토의 압밀 거동 특성을 나타

내는 5개의 함수 A, B, Z, C, D 값이다.

그림 8은 SICTA프로그램으로 분석된 출력 변수 값을 사용하여 카이올린점토의 압밀 구성관계를 나타낸 것으로 (a)는 간극비-유효응력사이의 관계, (b)는 간극비-투수계수 관계를 나타내고 있다. 이 결과를 이용하여 압밀에 의한 침하량을 산정할 수 있다. 침하량 산정과 관련된 내용은 추후 추가적인 논문에서 상세히 검토하고자 한다.

5. 실험의 특징 및 검증

5.1 실험의 특징

급속압밀실험은 성형되는 얇은 슬러리 상태의 연약한 흙의 압밀거동을 결정할 수 있는 방법으로 형태를 갖춘 시료를 사용하는 기존의 압밀시험과는 전혀 다른 메카니즘을 가지고 있다.

매우 연약한 준설투기토 같은 경우 압밀분석에 필요한 정확한 흙의 특성을 나타 낼 수 있는 변수를 결정하기가 쉽지 않다. 기존의 연약한 준설투기토의 경우 압밀에 의한 압축은 자중압밀에 대한 부분과 재하하중에 따른 압밀을 각각 자중압밀시험과 표준압밀시험을 통해 개별적으로 산출하여 해석에 사용하고 있다. 즉, 각각의 실험을 위해 시료를 개별적으로 준비해서 실험을 실시하고 각각의 결과를 종합하여 최종 압밀침하량을 결정하는 방법을 사용하고 있다. 또한 기존의 표준압밀시험의 경우 샘플링 된 시료를 성형하여 공시체로 사용하고 있다. 이 과정에서 시료에서 발생하는 여러 문제(예를 들면 응력해방)는 추후 실험값의 정확도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

이와 같은 기존 시험방법의 문제들을 근절하기 위해 급속압밀시험에서는 형태를 갖추지 못하는(성형되지 않은) 슬러리 상태의 흙 시료를 공시체로 직접 사용하여 실험을 실시하고, 침투압에 의한 압밀과 재하하중에 의한 압밀 실험이 동일 공시체에 대하여 연속적으로 이루어지도록 하였다. 성형되지 않은 슬러리 상태의 시료에 대해 연속적으로 실시된 실험이 기존의 실험방법 보다 정확하게 연약한 흙의 압축량을 반영할 수 있을 것이며, 결과적으로 압밀 해석의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다.

5.2 검증

급속압밀시험의 타당성을 검증하기위해 급속압밀시험에 사용된 동일 시료에 대해 표준압밀시험을 실시하고 그 결과가 비교 검토되었다. 그림 9는 두 실험 결과를 같이 표현한 것으로 압밀 응력이 증가함에 따라 급속압밀시험 결과(초기간극비 $e_0=2.3$)와 표준압밀시험 결과가 서로 수렴됨을 알 수 있다. 유효응력 약 300kPa 이상에서는 두 개의 결과 값이 거의 동일함을 알 수 있다. 이것은 압밀 응력이 증가하면서 흙속의 간극비가 감소하여 시료의 초기 상태에 관계없이 흙이 같은 거동을 보여주는 것으로 높은 압밀응력 상태에서 두 실험결과가 동일하게 나타난 것은 본 연구에서 제안된 실험법의 타당성을 보여주는 증거다.

급속압밀실험법의 타당성을 보여주는 또 다른 증거는 급속압밀시험결과를 이용하여 표준압밀시험을 정확히 재현할 수 있다는 것이다. Liu와 Znidarcic(1991)가 제안한 모델 식 (1)에서 함수 Z가 그 역할을 담당하는 것으로 기존의 선형압밀응력 변곡점의 위치를 나타낸다. 그림 9에서 굵은 점선으로 나타난 초기 간극비가 $e_0=1.6$ 인 상태에 대한 예측 곡선이 표준압밀시험 결과와 잘 일치됨을 알 수 있다.

압밀에 의한 정확한 침하량 예측은 침하량을 예측하고자 하는 현장에서 불교란된 대표 시료를 얻는 것에 크게 좌우되고 정확한 흙의 변형특성과 선형압밀응력의 결정이 설계와 예상 침하량을 정확히 산정하는데 대단히 중요한 변수로 작용한다(Leonards and Altschaeffl, 1964). 그러나 시료 시추, 운반, 다듬기 등의 일련의 공시체준비과정에서 시료의 교란은 피할 수 없어 흙의 변형특성과 특히 선형압밀응력 값에 영향을 미치다. 물론 교란에 대한 보정과 현장 흙의 압축곡선을 재 구성하기

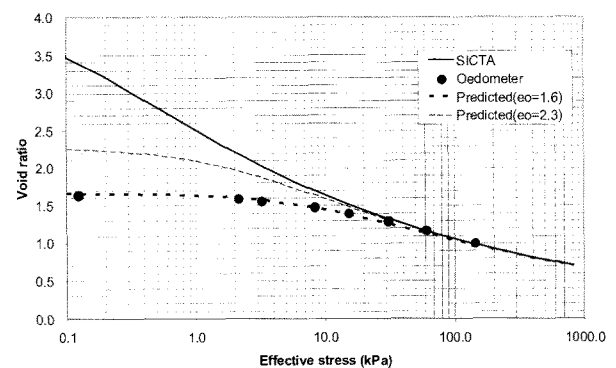


그림 9. 급속압밀실험 결과 vs. 표준압밀시험 결과

위한 방법이 Schmertmann(1955)에 의해 제시되어 사용이 되고 있으나 여전히 문제가 존재한다. 만약 현장 흙의 정확한 간극비가 제시된다면 급속압밀실험을 이용하여 기존의 표준압밀시험으로부터 구하는 간극비-유효응력의 관계를 손쉽게 획득할 수 있을 것이다. 그리고 급속압밀실험으로부터 제시된 결과가 표준압밀시험의 결과와 비교하여 허용할만한 오차 범위 내에 있다면 활용가능성이 충분히 있다고 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 비선형 거동을 보이는 성형되지 않은 연약한 흙의 압밀 거동을 침투압을 이용하여 연속적으로 빠르게(약 48시간~72시간 정도) 획득할 수 있는 급속압밀시험 방법에 대하여 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 플로우 펌프기법을 이용한 급속압밀시험은 삼축시험 장치를 개량한 것으로 기존의 압밀시험 방법과는 다르게 형태를 갖추지 못하는(성형되지 않은) 시료를 공시체로 사용하여 침투압에 의한 압밀, 하중재하에 의한 압밀, 압밀 후 투수계수 측정 순으로 동일 공시체에 대해 연속적으로 진행이 가능하다.
- (2) 실험결과 연약한 흙의 압밀 침하량 산정에 필요한 간극비와 유효응력 및 투수계수와와의 관계를 빠르게 산정할 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 급속압밀실험에 사용된 동일 시료에 대해 표준압밀시험을 실시하고 그 결과를 급속압밀시험 결과와 비교한 결과 서로 잘 일치되는 경향을 보여 급속압밀시험법이 슬러리 상태의 연약한 점성토의 압밀 거동을 예측하는데 문제가 없는 방법임을 입증하였다.
- (4) 또한, 현장의 정확한 간극비가 제시된다면 급속압밀시험을 이용하여 기존의 표준압밀시험으로부터 구하는 간극비-유효응력의 관계를 손쉽게 재현할 수 있어 급속압밀시험법의 검증뿐만 아니라 활용가능성도 제시되었다.

참고 문헌

1. 김형주, 오근엽 (1999), “연약한 준설패립 점성토지반의 자중압밀 과정에 관한 연구”, *한국지반공학회논문집*, 제 15권, 제 2호,

- pp.129-138.
2. 이범준, 이무천, 이송 (2007), “세립분 함유량에 따른 준설토의 침강 및 자중압밀특성”, *한국지반공학회논문집*, 제 23권, 제 8호, pp.129-135.
3. Abu-Hejleh, A. N. (1993), “Desiccation theory for soft soils”, Ph.D. dissertation, Civil Engineering Department, University of Colorado at Boulder.
4. Abu-Hejleh, A. N. and Znidarcic, D. (1994), “Estimation of the consolidation constitutive relations”, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Siriwardance & Zaman (eds) Balkema, Rotterdam, pp.499-504.
5. Abu-Hujleh, A. N. and Znidarcic, D. (1995), “Desiccation theory for soft cohesive soils”, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121, No.6, pp.493-502
6. Abu-Hejleh, A. N. and Znidarcic, D. (1996), “Consolidation characteristics of phosphatic clays”, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.4, pp.295-301.
7. Aiban, S. A. and Znidarcic, D. (1989), “Evaluation of the flow pump and constant head technique for permeability measurements”, *Geotechnique*, Vol.39, pp.655-666.
8. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M. J. L. (1967), “The theory of one dimensional consolidation of saturated clays”, *Geotechnique*, Vol.17, No.3, pp.261-273.
9. Gibson, R. E., Schiffman R. L. and Cargill, K. W. (1981), “The theory of one dimensional consolidation of saturated clays II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.18, pp.280-293.
10. Gjerapic, G. and Znidarcic, D. (2000), “Consolidation and desiccation analysis for poplar island site development plan”, Baltimore Harbor, Technical Report to Gahagan & Byrant Associates, Inc., by University of Colorado at Boulder.
11. Krizek, R. J. (2004), *Slurries in geotechnical engineering*, The twelfth Spencer J. Buchanan Lecture, University of Texas at A&M.
12. Kynch, E. J. (1952), “A theory of sedimentation”, *Transaction of the Faraday Society*, Vol.48, pp.168-176.
13. Leonards, G. A., and Altschaeffl, A. G. (1964), Compressibility of clay, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 90, SM5, pp.133-155.
14. Liu, J. C. and Znidarcic, D. (1991), “Modeling one-dimensional compression characteristics of soils”, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.1, pp.164-171.
15. McNabb, A. (1960), “A mathematical treatment of one-dimensional soil consolidation”, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol.17, pp.337-347.
16. Monte, J. L. and Krizek, R. J. (1976), “One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation”, *Geotechnique*, Vol.26, pp.495-510.
17. Schmertmann, J. H., 1955, The undisturbed consolidation behavior of clay, *Transactions, ASCE*, Vol.120, pp.1201-1233
18. You, Z. (1993), “Flow channeling soft clays and its influence on consolidation”, Ph. D. dissertation, Civil Engineering Department, University of Colorado at Boulder.
19. Yao, D.T.C, Oliveira-Filho, W. I., Cai, X. C. and Znidarcic, D. (2002), “Numerical solution for consolidation and desiccation of soft soils”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.26, No.2, pp.139-161.

(접수일자 2008. 9. 8, 심사완료일 2009. 4. 25)