

# 준설매립지반의 압밀거동 예측을 위한 구성관계식 산정 및 압밀정수 평가

## Evaluation of Constitutive Relationships and Consolidation Coefficients for Prediction of Consolidation Characteristics of Dredged and Reclaimed Ground

전 상 현<sup>1)</sup> · 유 남 재<sup>2)</sup> · 박 병 수<sup>†</sup>

Jun, Sanghyun · Yoo, Namjae · Park, Byungsoo

**ABSTRACT** : Consolidation characteristics of reclaimed ground with dredged soil and methods of evaluating them are investigated in this paper. For a dredged and reclaimed ground with a very high water content, self-weight consolidation being progressed, its consolidation characteristics are difficult to find since it is almost impossible to have a undisturbed sample. In order to overcome such a problem, methods of laboratory tests with disturbed sample were studied to obtain consolidation parameters required to analyze consolidation settlement in practices, using the conventional infinitesimal consolidation theory, were evaluated by carrying out various laboratory tests with disturbed soils such as oedometer test, constant rate of deformation test, Rowe-cell tests with ring diameters of 60 mm, 100 mm and 150 mm and the centrifuge model tests with 40 g-levels. Constitutive relations of void ratio - effective vertical stress - permeability were evaluated by using the inverse technique implemented with the finite strain consolidation theory and results of centrifuge model tests. Design soil parameters related to consolidation such as compression index, swelling index, coefficient of volume change and vertical and horizontal consolidation coefficients were proposed properly by analyzing the various test results comprehensively.

**Keywords** : Dredged-Reclaimed Ground, Dredged Soil, Consolidation Characteristics, Centrifuge

**요 지** : 본 연구에서는 해성점으로 기 매립된 준설토 지반의 압밀특성 및 평가방법에 대한 연구를 실시하였다. 자중압밀 진행 중인 고함수비의 준설매립지반은 불교란 시료의 채취가 사실상 불가능하므로 압밀특성 파악에 어려움이 있다. 이를 위해 실무에서 압밀 거동 분석을 위해 적용하는 압밀정수를 교란된 시료로 이용하여 실내실험으로 평가하는 방법에 대하여 연구를 진행하였다. 실험은 기본물성실험과 표준압밀실험, 일정변형률압밀실험과 60, 100, 150mm 직경의 Rowe-cell 압밀실험을 수행하였으며, 함수비 조건을 변화하면서 40g의 중력수준에서 원심모형실험을 수행하였다. 실내 압밀실험시 현장의 응력조건에 해당하는 강제압밀로 시료를 조성하여 보다 합리적인 압밀특성을 파악할 수 있었다. 원심모형실험결과로 획득한 시간-침하관계를 침하예측기법으로 분석하여 최종 침하량을 분석하였다. 분석결과, Asaoka 방법을 적용한 해석결과가 원심모형실험에 의한 자중압밀결과의 경향을 잘 나타내었으며, 이를 통하여 최종침하량을 추정하였다. 또한, 실내압밀실험과 자중압밀실험결과에 대한 역해석을 통하여 유한변형률 압밀이론의 간극비-유효응력-투수계수 구성관계식을 산정하였다. 구성관계와 다양한 압밀실험을 통하여 획득한 결과를 비교 분석하여 연구대상 지역의 압축지수, 팽창지수, 체적변화계수, 연직 및 수평압밀계수 등의 압밀정수를 제안하였다.

**주요어** : 준설매립지반, 준설토, 압밀특성, 원심모형실험

## 1. 서 론

최근 각종 해안·항만시설구축으로 준설 및 매립사업은 계속적으로 진행되고 있으며, 특히 서남권을 주요 대상지역으로 하여 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 준설매립 공사의 매립재로서 해성점토를 준설하여 투기하는 것은 수급조건과 경제성을 고려할 때 불가피한 선택이 아닐 수 없다(한국지반공학회, 2005). 이러한 연약 해성점토는 매우 높은 함수비로 매립되며, 원지반 해성점토와는 다른 역

학적 거동으로 특히 큰 압밀침하량이 나타난다.

따라서 침하량을 지배하는 침강 및 압밀거동은 매립장 설계시의 소요 준설·매립물량의 산정, 호안의 제원 결정과 매립지반의 단·장기적인 침하예측에 매우 중요한 설계인자가 되며 이에 대한 정확한 예측이 요구된다. 특히, 최근에는 준설토 투기장으로 설계되어 투기가 완료된 후 수개월이상 방치된 매립지를 시설물을 건설하기 위한 부지로 활용하려는 사업이 수행되고 있다. 이러한 매립지에서는 과거에 투기장 목적만으로 설계와 시공을 수행하였기 때

1) 비회원, 세경대학 건설환경과 전임강사

2) 비회원, 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수

† 정회원, 강원도립대학 건설토목과 전임강사(E-mail : bspark@gangwon.ac.kr)

문에 준설토의 명확한 침강·압밀 특성을 분석하기 위한 신뢰성 있는 설계자료가 부족하며, 시공시 투기된 준설토의 종류나 투기일지 등의 공사기록에 대한 자료 확보가 어렵다. 그러므로 이러한 매립지를 부지로 활용하기 위해서는 추가의 조사 및 실험을 통하여 매립지반의 특성을 규명해야 한다. 투기후 수개월이상 방치된 매립지는 침강 및 자중압밀이 진행되어 투기시에 비해 함수비가 크게 낮아졌으나 자연적으로 퇴적된 원지반 해성점토보다는 높은 함수비를 가지고 있으며, 이로 인해 불교란 시료를 채취하는 것은 매우 어렵다.

그러므로 본 논문에서는 매립지에서 채취된 교란시료로 실내실험을 수행하여 현장 준설토매립토의 압밀특성을 분석하기 위한 연구를 수행하였다. 실내실험으로는 표준압밀시험, CRS압밀시험, Rowe-cell압밀시험, 원심모형실험 등을 수행하였으며, 높은 함수비를 갖는 준설토의 간극비-유효응력-투수계수의 구성관계를 획득하기 위하여 유한변형률 압밀이론을 적용하였다. 이러한 연구를 통하여 구한 준설토의 압밀특성을 종합하여 설계실무에서 적용할 수 있는 압밀정수의 획득방안을 제시하였다.

## 2. 이론고찰

### 2.1 매립지 준설토 침강 및 압밀 거동

자연상태에서 퇴적된 해성점토는 매우 큰 폭의 지반공학 적 특성을 지니고 있다. 1~2cm/년의 낮은 퇴적속도는 토립자간의 이동이 발생하기 전에 토립자간의 고결(Cementation)이 유도되므로 심도에 관계없이 매우 높은 함수비를 보인다. 토립자간 고결이 깨질 정도의 유효응력이 발휘되기 전까지 매우 높은 간극비 상태로 유사안정구조(Metastable Structure)를 지니게 된다. 퇴적이 지속적으로 이루어져 토 피하중이 증가하면 토립자간의 고결이 붕괴되면서 입자간 이동 즉 압밀로 간극수압이 발생하고, 퇴적층에 작용하는 하중이 전응력으로 나타나는 현상은 현장조사에서 많이 확인되었다. 이러한 자연상태 연약지반의 침강·압밀거동은 전단강도의 변화를 동시에 유발시키며 또한, 장기간에 걸쳐 시간의존효과(Aging Effect)가 나타나 예민비를 증가시키게 된다. 이와 같이 자연상태의 침강퇴적 과정은 매립지에 인위적으로 준설토를 투기할 때의 침강·압밀과정과 비교할 수 있다.

매립지에 투기되는 고함수비의 준설토는 토출구를 통해 배출되면서 평면상으로 넓게 퍼지게 되며, 토립자가 이동함에 따라 광역적인 입도분리가 발생한다. 즉, 토출구에서 가까울수록 조립질이 많이 함유되며, 멀어질수록 세립질의

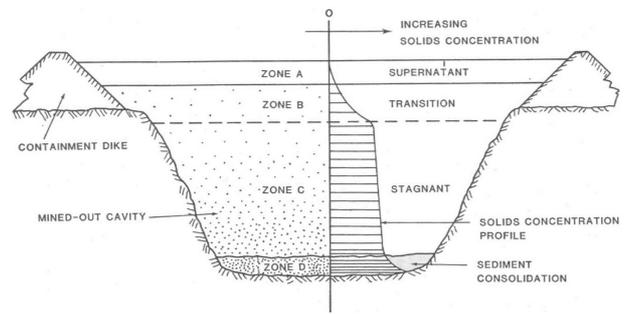


그림 1. 매립장 부유물의 밀도분포 단면도

함유량이 높은 슬러리가 퇴적된다. 그러므로 토출구와의 거리에 따라 위치별로 다른 침강·퇴적현상을 보이게 된다. 준설토 투기시 대표적인 토립자의 침강은 그림 1에 나타난 바와 같다.

토립자의 함유율이 무게비로 1~3%정도인 경우 상부 Zone A에는 슬러리의 침강 및 압밀에 의한 상등수가 형성된다. Zone B에서는 토립자의 농도가 깊이에 따라 증가하면서 일정한 밀도를 갖는 Zone C 상부까지 천이영역(Transition Zone)으로 불리는 구간을 형성된다. 일정한 밀도를 갖기 시작하는 Zone C에서는 침강속도가 상부에 비하여 급격히 감소하기 때문에 지연영역(Stagnant Zone)으로 불린다. Zone C와 Zone D(Sediment Consolidation)의 구분은 명확하지 않으나, Zone C의 하부에서는 대변형 압밀이론을 사용하여 침하속도를 성공적으로 추정된 것으로 보고된 바가 있다(Yong, 1984). 그러므로 침강이 완료되어 장기간에 걸쳐 압밀이 진행되는 Zone D 영역의 침하거동 분석을 위해 대변형 이론인 유한변형률 압밀이론을 적용하였다.

### 2.2 유한변형률 압밀이론

압밀해석을 위해 일반적으로 쓰여지고 있는 Terzaghi의 압밀이론은 흙의 압밀현상을 이론적으로 표현하기 위하여 여러 가지 가정을 포함하고 있으며, 그 중 간극비와 유효응력의 선형적 관계, 압밀이 진행되는 동안의 일정한 투수계수, 그리고 미소변형(Infinitesimal Strain)이라는 세 가지 가정이 중심이 되고 있다. 이러한 가정하에서 유도된 Terzaghi의 압밀이론식으로 큰 침하가 나타나는 매립지 준설토를 해석하는 것은 기본가정의 불일치로 인해 적절한 결과 획득이 어렵게 된다. 따라서, 큰 침하량이 예상되는 일차원 압밀해석에서는 유효응력-간극비-투수계수의 비선형 구성관계와 압밀에 따른 변형이 고려되는 유한변형률 압밀이론의 사용이 요구된다.

본 연구에서 적용한 유한변형률 압밀이론은 Gibson 등(1967)에 의해 제안된 이론이다. 간극의 완전포화, 유효응력법칙과 Darcy 법칙의 유효성, 토립자와 간극수의

비압축성 등을 기본가정으로 하여 간극수와 토립자로 구성된 혼합체에서의 힘의 평형, 질량보존법칙이 고려된 토립자와 간극수의 시간변화에 대한 연속정리, 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계가 적용되는 다음과 같은 비선형 유한변형을 압밀지배방정식을 유도하였다(이종호, 2000).

$$\left[ \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right] \frac{d}{de} \left[ \frac{k(e)}{e+1} \right] \frac{\partial(e)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\gamma_s$  : 흙의 단위중량,  $\gamma_w$  : 물의 단위중량  
 $e$  : 간극비,  $k$  : 투수계수  
 $\sigma'$  : 유효응력,  $z$  : 축소좌표,  $t$  : 시간

식 (1)의 지배방정식은 유효응력과 투수계수를 간극비의 함수로 표시하므로 비선형 구성관계에 대하여도 적용이 가능하다. 또한, 축소좌표로 구성되어 있어 이류좌표로 변환이 가능할 뿐 아니라 압밀에 의한 변형률의 크기에 제한을 받지 않는 지배방정식의 형태를 지니고 있다.

과잉간극수압이 변수로 표시되는 지배방정식은 토립자 자중에 의한 압밀효과를 외적규정으로 표시해야 되는 불편함이 있는 반면에 식 (1)의 지배방정식은 간극비를 변수로 유도함으로써 토립자의 자중에 의한 압밀효과가 용이하게 고려된다. 식 (1)의 방정식은 자중에 의한 압밀효과를 나타낸 첫 번째항(Convective Term)과 상재하중에 의한 압밀효과를 나타낸 두 번째항(Conduction Term)으로 구성되어 있다. 시료의 두께가 작은 실내 압밀시험이나 현장조건에서 상재하중의 크기가 점토층의 자중에 비해 상당히 클 경우에는 첫 번째항을 무시할 수 있다. 또한 축소좌표를 사용함으로써 이동하는 경계조건의 문제를 수치해석에서 간단하게 처리할 수 있는 편리함이 있다.

### 3. 실험내용

매립완료 후 방치된 준설토 지반의 압밀특성을 파악하고, 설계에 요구되는 압밀정수 평가를 위하여 전라남도 여수인근의 준설토매립지반을 대상으로 선정하였다. 본 연구대상 지역은 2002년 1월부터 24개월간 펌프준설토로 투기된 준설토매립토 지반이며, 준설토 후 시료 채취시점까지 약 30개월이 경과되었다.

#### 3.1 시료의 준비

본 연구 대상지역은 82.7~172.9%의 비교적 높은 함수비를 갖는 연약지반으로 불교란 시료의 채취가 사실상 불가

능하다. 그러므로 교란된 시료를 채취하였으며, 투기시기와 매립지 위치 등을 감안하여 세 개의 구간(1~3구간)으로 분할하여 채취하였다. 교란된 시료를 자중압밀실험에 직접 이용하는 것은 자중압밀실험이 원심모형기를 이용하여 투기 직후부터 침강·압밀을 모사하기 때문에 타당하다 할 수 있다. 그러나 현재 매립지의 압밀특성 특히 이방성의 수평압밀계수 등을 분석하기위한 압밀실험에 교란시료를 직접 적용하는 것은 다소 무리가 있을 것이다. 따라서 표준압밀실험의 일부와 Rowe-cell압밀실험은 현재의 지반조건을 모사하도록 강제압밀을 유도하여 시료를 조성하였다. 강제압밀에 의한 시료조성은 자중압밀에서의 시간경과를 정확하게 모사하기는 어려우나 자중압밀에 따른 유효응력 발현의 관점에서 단기간내에 시료를 조성할 수 있는 가장 현실적인 방안이라 할 수 있다. 본 연구에 적용된 강제압밀 시료조성 장치는 그림 2와 같으며, 강제압밀 토조의 시

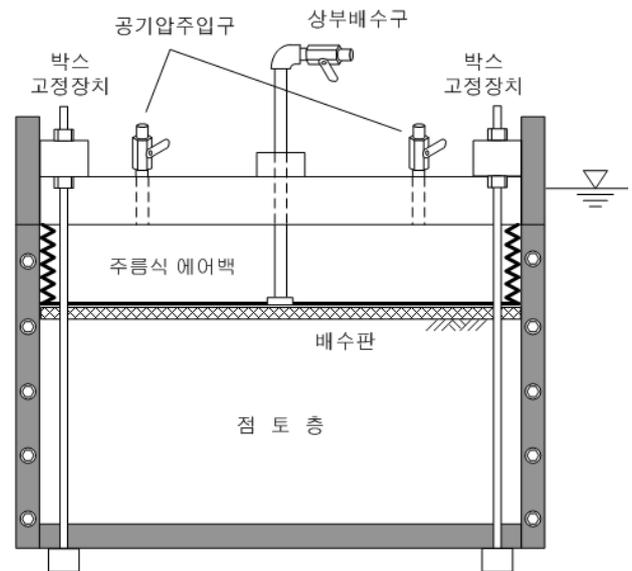
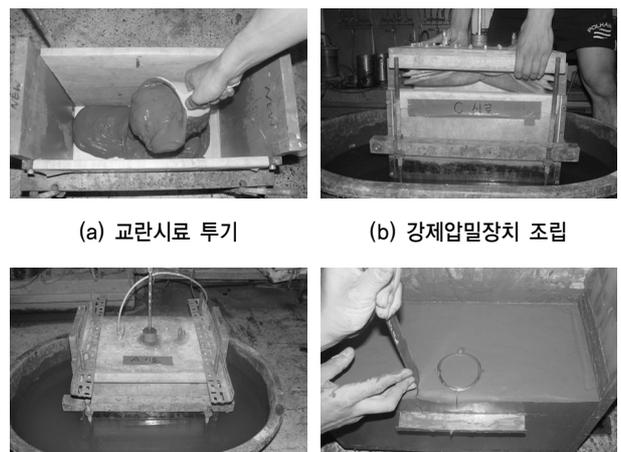


그림 2. 강제압밀조성 실험장치



(a) 교란시료 투기 (b) 강제압밀장치 조립

(c) 강제압밀 수행 (d) Rowe-cell 압밀실험용 시료채취

그림 3. 강제압밀시료 조성 및 채취

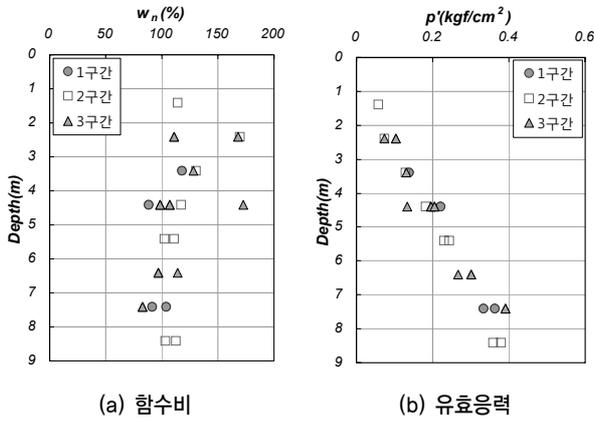


그림 4. 강제압밀 시료조성을 위한 심도별 함수비 분포

료 조성 및 압밀수행, Rowe-cell 압밀실험을 위한 시료 채취를 그림 3에 나타내었다.

시료조성을 위한 강제압밀시의 선행응력은 다음과 같이 결정하였다. 그림 4와 같이 연구대상지역의 심도별 현장함수비와 비중으로 수중단위중량을 산정하고, 현장의 유효응력을 계산하였다. 그림과 같이 깊이에 따라 유효응력이 증가하고 있으며, 중간심도에서 0.23kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 그러므로 본 연구에서는 강제압밀 적용응력을 0.2kgf/cm<sup>2</sup>로 설정하였으며, 0.05kgf/cm<sup>2</sup>의 하중을 24시간마다 증가하면서 단계별로 가압하였다.

### 3.2 실내실험

본 연구를 위한 실내실험으로 표 1과 같이 비중, 액·소성한계, 입도분석실험의 기본물성실험과 표준압밀실험, 일정변형률압밀실험(CRS), 60mm, 100mm, 150mm 직경을 갖는 Rowe-cell 수평압밀실험을 수행하였다. 각 실험방법은 표 1과 같이 한국산업규격(KS)이나 Head(1986)가 제안한 방법으로 수행하였다.

### 3.3 원심모형실험

준설토의 침하특성과 구성관계를 산정하기 위하여 교란시료를 원심모형기(Geo-centrifuge)에서 40g의 중력수준으로 가속하여 일면배수 조건으로 자중압밀실험을 수행하였다. 원심모형실험기는 강원대학교에 소재한 것으로 팔길이

표 1. 실내실험 항목 및 조건

실험 항목	기본 물성실험	연직방향 압밀실험		수평방향(Rowe Cell) 압밀실험		
		표준압밀	CRS압밀	D60mm	D100mm	D150mm
교란시료	9회	9회	2회	-	-	-
강제압밀시료	-	6회	-	3회	1회	1회
시험방법	KS F 2302 등	KS F 2316		Head(1986)		

표 2. 원심모형실험 조건

대상시료	실험	함수비 조건	시료높이(모사 높이)
2구간 (B시료)	Test 1	현장함수비(147%)	12.5cm(5m)
	Test 2	200%	10.0cm(4m)
3구간 (C시료)	Test 3	현장함수비(120%)	12.5cm(5m)
	Test 4	200%	10.0cm(4m)

1.35m에 20g·tonf까지 가속이 가능한 장치이다. 교란시료를 투명아크릴로 제작된 원형토조에 투기하고, 토조앞면에 부착된 Scale을 원심모형실험기내에 설치된 Video Camera로 읽어 침하량을 측정한다. 토조의 측면과 저면에는 간극수압계를 설치하여 자중압밀시 시간경과에 따른 간극수압을 측정한다. 시료 및 실험조건은 표 2와 같으며, 1구간은 기본물성 실험결과와 시공시 투기조건 등이 2구간과 유사하여 자중압밀실험을 수행하지 않았다.

## 4. 압밀특성 분석

### 4.1 기본물성 및 표준압밀실험

구간별로 분할 채취한 1~3구간 시료의 기본물성실험 결과를 표 3에 정리하였다. 시료의 초기함수비는 120~147%, 액성한계는 62~69%이며, 통일분류상 모두 CH로 나타났다.

그림 5에는 표준압밀실험에 의해 획득한 교란시료 및 강제압밀시료의 간극비에 따른 유효응력을 도시하였다. 전반적으로 큰 차이가 나타나지는 않으나 교란시료(Dist. #1~#3)에 대한 압축지수는 0.64~0.83, 평균 0.74로 강제압밀시료

표 3. 기본물성실험 결과

기본물성		1구간	2구간	3구간	
초기함수비	wn	147%	146%	120%	
#200체 통과량	P <sub>#200</sub>	99.1%	99.4%	99.7%	
비중	GS	2.72	2.72	2.73	
연경도	액성한계	LL	69.8%	62.0%	64.9%
	소성한계	PL	29.6%	28.2%	29.0%
	소성지수	IP	40.2	33.8	35.9
통일분류(USCS)		CH	CH	CH	

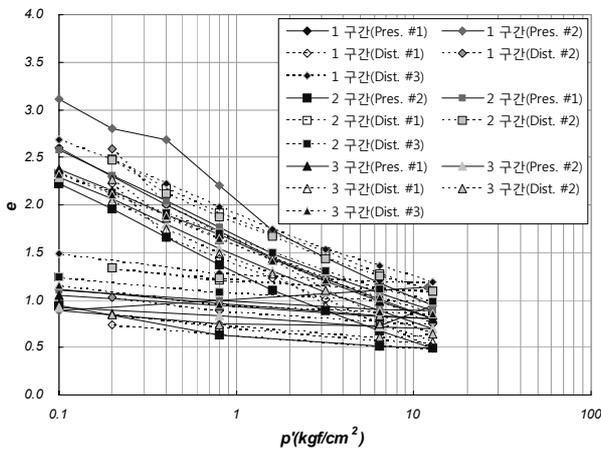
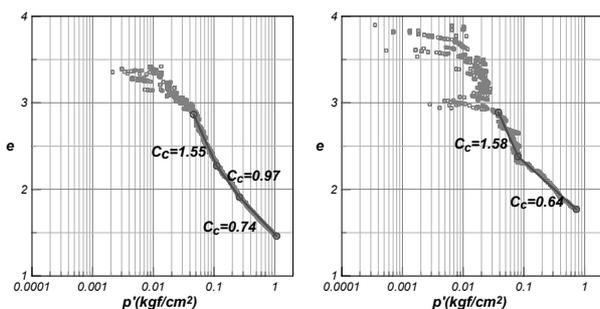


그림 5. 표준압밀시험 결과

(Pres. #1~#2)의 압축지수 0.75~0.83 평균 0.80에 비하여 다소 작게 나타났다. 이는 전혀 교란되지 않은 원지반의 처녀압축곡선에서 시료를 채취하거나 교란이 될수록 압축지수가 감소하는 일반적인 경향과 유사하다고 볼 수 있다. 즉, 강제압밀된 시료 보다 완전교란된 시료가 더 큰 교란도를 가지기 때문에 미소하게나마 압축지수가 작게 나타난다고 판단된다.

#### 4.2 CRS압밀시험

CRS압밀시험에 의해 구한 간극비에 따른 유효응력을 그림 6에 나타내었다. 실험초기의 높은 간극비에서는 자료의 분산이 있으나 2.9이하의 간극비에서는  $e-\log p'$ 이 일정한 관계로 나타나며, 전반적으로 반대수축측상 비선형 분포를 보이고 있다. CRS압밀시험의 비선형결과로부터 압축지수를 평가하기 위해 간극비에 따라 2, 3개의 구간으로 나누어 분석하였다. 2구간 시료는 간극비 1.77~2.38에서 0.64의 압축지수로 분석되었으며, 2.38~2.89 간극비 범위에서는 1.58의 압축지수로 나타났다. 3구간 시료는 간극비 1.46~1.91의 범위에서 0.74, 간극비 1.91~2.27의 범위에서 0.97, 간극비 2.27~2.87범위에서 1.55의 압축지수가 나타났다. 이와



(a) 2구간 시료

(b) 3구간 시료

그림 6. CRS시험에 의한 압축지수 평가

같이 선형적으로 분석한 압축지수도 간극비가 증가할수록 큰 값으로 도출되었으며, 간극비-유효응력이 전반적으로 비선형성을 띠는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4.3 Rowe-cell 수평압밀시험

Rowe-cell 수평압밀시험은 60mm, 100mm, 150mm의 3가지 직경에 대하여 실시하여 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 보는 바와 같이 0.1kgf/cm<sup>2</sup>의 하중에서  $0.8\sim 2.1\times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{sec}$ 의 수평압밀계수,  $c_h$ 를 보이다가 0.2kgf/cm<sup>2</sup>의 하중에서  $1.5\sim 3.8\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{sec}$ 의  $c_h$ 로 감소하였다. 이후 하중이 증가함에 따라  $c_h$ 가 증가하는 경향을 보였다. 직경 100mm와 150mm는 실험기의 한계상 1.6kgf/cm<sup>2</sup>의 하중을 최대로 가했으며, 이 때 수평압밀계수는  $3.0\sim 3.2\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{sec}$ 로 나타났다. 직경 60mm의 실험에서는 최대 12.8kgf/cm<sup>2</sup>의 하중까지 가했으며, 수평압밀계수는  $6.3\sim 9.1\times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{sec}$ 로 분석되었다.

#### 4.4 원심모형시험

2구간과 3구간의 교란시료에 대하여 현장함수비와 200% 함수비 조건으로 하여 원심모형시험을 수행하여 시간에 따른 침하량을 획득하였다. 원심모형기를 이용한 자중압밀시험에서 간극비-유효응력-투수계수의 구성관계를 역해석하기 위해서는 시간에 따른 침하와 함께 자중압밀의 침하를 획득해야 한다. 원심모형시험의 모형시간이 실제시간의 제곱에 비례하여 빠르게 압밀을 진행하나 실험종료시의 마지막 읽은 침하량값이 정확하게 최종침하량이라 판단하기는 어렵다. 그러므로 자중압밀시험 결과의 최종침하량을 분석하기 위하여 현재 침하예측기법으로 많이 사용되고 있는 쌍곡선법과  $\sqrt{t}$  법, Asaoka 법을 적용하였다. 각 침하예

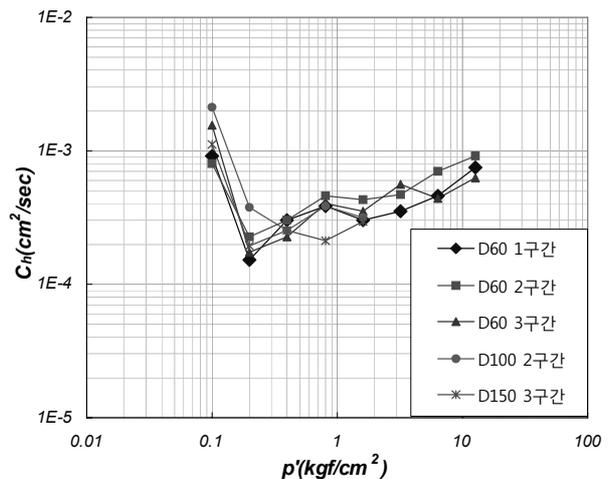
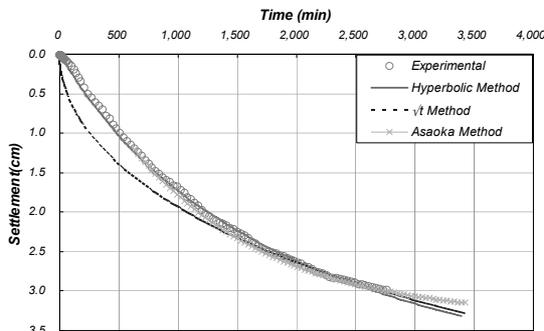


그림 7. Rowe-cell압밀시험에 의한 수평압밀계수

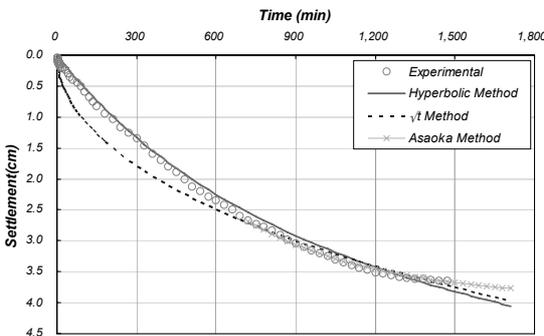
측기법의 이론적 내용과 특징은 기존의 연구자료(이정기, 1999 ; 전진용,2008)를 참조하였다.

침하예측기법에 의해 자중압밀실험의 시간-침하관계를 분석한 결과 중 대표적으로 2구간의 현장함수비조건(Test 1)과 3구간의 200% 함수비조건(Test 4)의 시간에 따른 침하량을 그림 8에 도시하였다. 그림 8에서와 같이 모든 실험조건에서 Asaoka법이 가장 유사하게 침하경향을 예측하고 있는 것으로 분석되었다. 그러므로 Asaoka법에 의해 예측된 최종침하량을 역해석 기법 적용을 위한 값으로 적용하였으며, 적용된 최종침하량과 최종침하 시점에서의 평균 간극비를 산정하여 표 4에 정리하였다.

결과에서 보는 바와 같이 2구간에서 함수비가 작은 현장함수비(147%)조건에서 침하량이 3.35cm로 200%함수비의 4.00cm의 침하량보다 작게 발생하였다. 3구간의 자중압밀실험결과에서도 현장함수비(120%)조건에서 2.43cm 침하량이 나타나 200%함수비조건인 3.95cm 침하량보다 작게 발생하였다.



(a) 2구간 자연함수비(Test 1)



(b) 3구간 200%함수비(Test 4)

그림 8. 시간에 따른 침하량 추정

표 4. 자중압밀실험결과

구 분	2구간		3구간3	
	현장함수비	200%함수비	현장함수비	200%함수비
초기높이	12.5cm	10.0cm	12.5cm	10.0cm
최종침하량	3.35cm	4.00cm	2.43cm	3.95cm
최종간극비	2.56	2.97	2.49	2.87

## 5. 역해석에 의한 구성관계식 산정

연구대상지역의 현장은 82.7~172.9%의 함수비와 2.25~4.70의 간극비 범위로 분포하고 있다. 그러나 표준압밀, CRS 실험 등은 모두 3.0이하의 간극비에 대한 결과가 도출되므로, 높은 함수비를 갖는 대상지역의 준설매립토 압밀거동 평가를 위해서 고함수비의 간극비-유효응력-투수계수의 관계규명이 중요하다. 이를 위하여 원심모형실험 결과를 유한변형률 압밀이론에 의한 수치해석으로 역해석하여 간극비-유효응력-투수계수의 구성관계를 아래와 같이 획득하였다.

### 5.1 산정방법

구성관계식 산정은 먼저 비교적 낮은 간극비에 대한 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계를 표준압밀실험과 CRS압밀실험 등을 통하여 획득한다. 이 자료를 기지점으로 하여 Schiffman(1984)이 소개한 식 (2)의 지수함수로 구성관계식을 산정하였다. 식 (2)의 구성관계는

$$e = \frac{A + B \times \ln(\sigma')}{1 + C \times \ln(\sigma') + D \times (\ln \sigma')^2}$$

$$e = \frac{E + F \times \ln(k)}{1 + G \times \ln(k) + H \times (\ln k)^2} \quad (2)$$

여기서,  $e$  : 간극비,  $\sigma'$  : 유효응력  
 $k$  : 투수계수, A~H : 계수

원심모형실험과 압밀실험 결과를 역해석하여 구성관계식을 산정하는 방법은 이종호(2000), 유남재 등(2000, 2002)의 연구와 같은 역해석기법으로 구하였으며, 이를 요약하면 다음과 같다. 먼저, 표준압밀실험과 CRS압밀실험 등을 통하여 획득한  $e$ - $\sigma'$ - $k$ 를 이용하여 여러개의 구성관계를 추정한다. 추정된 여러개의 구성관계로 원심모형실험과 같은 조건의 수치해석을 실시한다. 수치해석은 2.2절에 나타난 유한변형률 압밀이론의 지배방정식을 기초로 하여 개발한 유한차분 수치해석 프로그램인 KWCON(KangWon national university CONSolidation program)을 사용하였다(이종호, 2000). 여러개의 구성관계별로 획득한 시간-침하의 해석결과와 원심모형실험에서 획득한 결과를 비교하여 가장 유사한 결과를 도출하는  $e$ - $\log \sigma'$ ,  $e$ - $\log k$ 의 관계를 구성관계식으로 산정하였다.

### 5.2 구성관계식 산정 결과

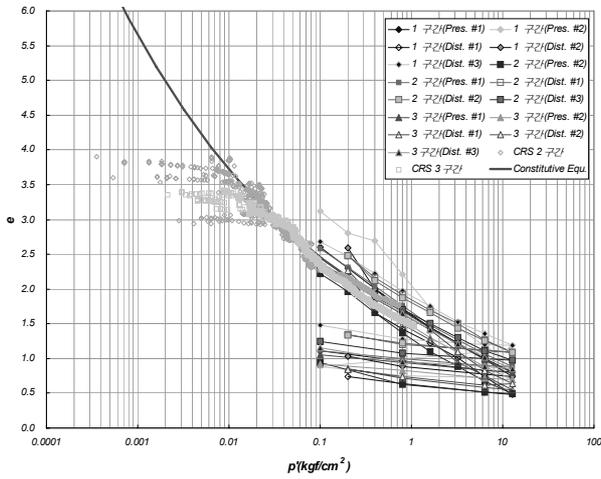
5.1절에서 설명한 방법으로 산정한 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계는 식 (2)의 지수함수 형태로 유도하였으며, 식 (3)과 같이 산정하였다. 간극비-유효응력의

구성관계를 표준압밀실험과 CRS압밀실험의  $e-\log \sigma'$  결과와 함께 그림 9(a)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 간극비 증가에 따라 비선형적으로 유효응력이 감소함을 알 수 있으며, 저함수비 범위에서는 표준압밀 및 CRS압밀 실험 결과와 부합되어 나타났다. 간극비-투수계수의 구성관계는 표준압밀과 CRS압밀실험의  $e-\log k$  결과와 함께 그림 9(b)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 간극비 증가에 따라 비선형적으로 투수계수가 증가함을 알 수 있으며, 낮은 간극비범위에서는 표준압밀실험 및 CRS압밀실험 결과의 범위내에서 구성관계가 형성되어 있다.

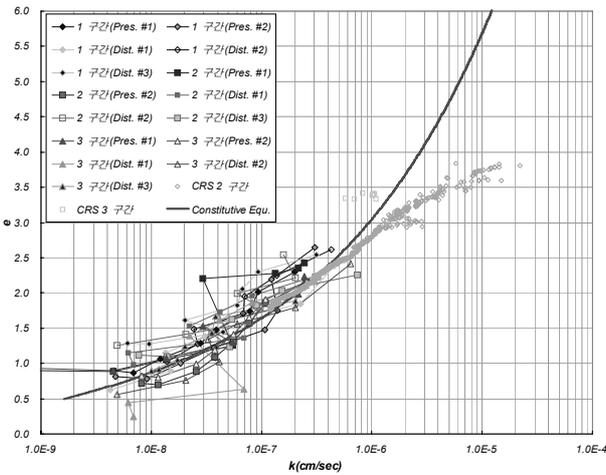
$$e = \frac{2.46 - 0.156 \times \ln(\sigma')}{1 + 0.116 \times \ln(\sigma') + 0.448 \times 10^2 \times (\ln \sigma')^2}$$

$$e = \frac{16.22 + 0.900 \times \ln(k)}{1 - 0.0603 \times \ln(k) + 0.0386 \times (\ln k)^2} \quad (3)$$

산정된 구성관계식을 입력자료로하여 원심모형실험으로 수행한 자중압밀실험을 유한변형률 압밀이론에 의한 유한



(a) 간극비-유효응력 구성관계



(b) 간극비-투수계수 구성관계

그림 9. 역해석으로 산정된  $e-\sigma'-k$  구성관계

차분해석으로 분석하고, 그 결과를 시간에 따른 침하량으로 실험결과와 함께 그림 10과 표 5에 나타내었다. 그림 10에서 보는 바와 같이 도형으로 표시된 실험결과(Test 1~4)와 실선으로 표시된 해석결과가 4가지의 실험조건에서 모두 유사하게 나타났다. 표 5에서와 같이 원심모형실험의 최종침하량과 구성관계식을 적용한 수치해석의 최종침하량이 0.09~2.89%의 편차로 나타나 구성관계식이 비교적 높은 신뢰도로 분석되었다고 판단된다.

## 6. 압밀정수 산정

실무에 있어서 연직배수공법 및 Preloading 등이 적용되는 일반적인 연약지반개량은 대체로 Terzaghi(1943)와 Hansbo(1981)가 제시한 압밀이론으로 해석하여 설계를 수행하게 된다. 이러한 압밀이론에는 위에서 구한 간극비-유효응력-투수계수의 구성관계가 입력되지 않고, 압축지수  $c_c$ , 연직압밀계수  $c_v$ , 수평압밀계수  $c_h$ , 연직투수계수  $k_v$ , 체적압축계수  $m_v$ 와 일반적으로 같은 값으로 가정되는 팽창지수  $c_s$ 와 재압축지수  $c_r$  등이 적용된다. 따라서 본 연구에서는 설계실무에 사용되는 압밀정수를 실험결과와 역해석에 의한 구성관계 등을 근거로 산정하였다.

본 연구에서 압밀특성 파악을 위하여 각 구간별 실험결과를 분석한 결과, 구간별 시료가 명확하게 다른 특성을 갖는다고 판단하기는 어려웠으며, 불교란 및 교란, 강제압밀

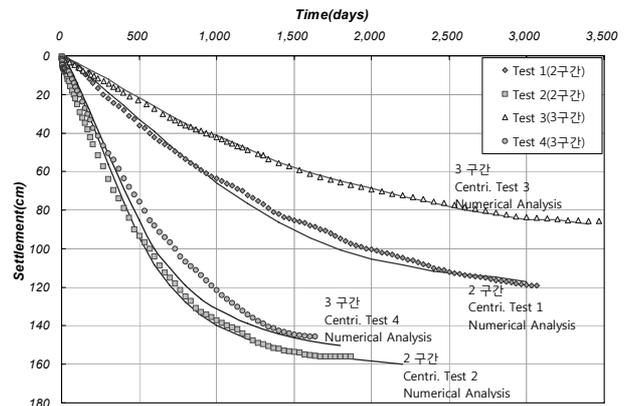


그림 10. 원심모형실험 및 수치해석에 의한 시간-침하

표 5. 원심모형실험과 산정된 구성관계식에 의한 최종침하 비교

실험 구간	실험 번호	실험결과 (m)	최종침하량(m)		
			실험예측	수치해석	편차
2구간	Test 1	1.192	1.340	1.297	2.89%
	Test 2	1.560	1.600	1.599	0.09%
3구간	Test 3	0.856	0.980	0.995	2.37%
	Test 4	1.456	1.580	1.536	2.53%

시료가 전반적으로 유사한 경향으로 분석되었다. 이는 현재 분석대상 시료가 매립된 점토로 준설 및 투기에 의해 입자의 구조가 완전히 교란된 후 자연퇴적지반과 달리 입자의 배치가 충분히 안정화되지 못한 교란된 시료의 특성을 지니고 있기 때문이라고 판단된다. 그러므로 압밀특성은 구간별로 구분하지 않고 전체지역을 통합하는 값으로 산정하였다.

### 6.1 압축지수

그림 5와 같이 간극비-유효응력상에서 표준압밀실험 결과는 전반적으로 유사한 기울기로 나타났으며, 분석결과, 0.64~0.89의 범위로 0.78의 평균을 보였다. 이에 반하여 CRS실험 결과는 그림 6과 같이 압축지수가 간극비에 따라 다른 경향으로 나타났다. 또한, 고탍수비의 자중압밀실험으로 획득한 시간-침하 관계를 역해석하여 구한 구성관계에서도  $e-\log\sigma'$ 을 비선형 관계로 분석하였기 때문에 실무의 적용을 위하여 압축지수를 다음과 같이 두 개의 경우로 제시하고자 한다.

#### (1) 간극비 2.5 전·후로 압축지수를 다르게 적용하는 경우

간극비 2.5는 표 4의 자연함수비 조건의 자중압밀실험 결과와 같이 준설매립층의 자중압밀 종료시점에서 예상되는 간극비로 비교적 높은 함수비조건 이다. 2.5보다 큰 간극비 범위에서는 그림 6의 CRS압밀실험 및 그림 9(a)의 구성관계식 결과와 같이  $e-\log\sigma'$  관계가 비선형적이며, 2.5 이하의 간극비 범위에 비하여 급한 기울기를 보인다. 그러므로 간극비 2.5이상의 범위에서 압축지수를 평균하여 그림 11의 ㉠과 같이  $c_c(e > 2.5) = 1.32$ 로 제안하였다. 또한, 2.5이하의 간극비 범위에서는 그림 5의 표준압밀실험결과와 그림 6의 CRS압밀실험 결과의 평균값인  $c_c(e \leq 2.5) = 0.79$ 로 그림 11의 ㉡와 같이 제안하였다.

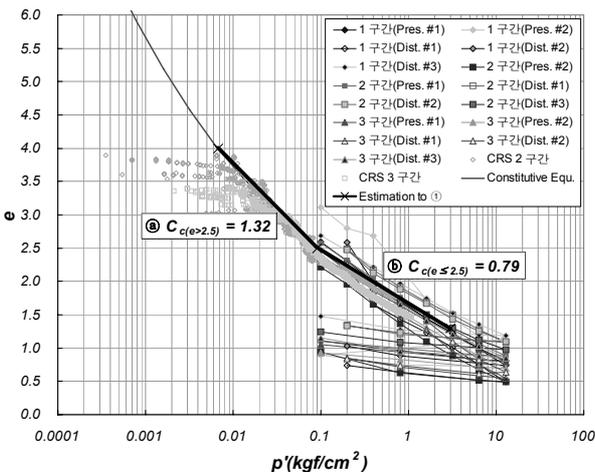


그림 11. 압축지수 제안 1

#### (2) 하나의 압축지수로 적용하는 경우

Terzaghi의 1차원 압밀이론을 적용하는 일반적인 연약 지반 압밀해석에서는 압밀대상층의 압축지수는 하나의 값으로 적용하게 된다. 그러므로 한 개의 값으로 산정하기 위하여 압축지수를 예상 간극비 범위내의 압축지수의 평균값인  $c_c = 1.02$ 로 그림 12와 같이 제안하였다.

### 6.2 체적압축계수

본 연구대상시료의 체적압축계수,  $m_v$ 는 표준압밀실험, CRS 압밀실험 및 구성관계식으로부터 산정하였다. 그림 12에 나타난 바와 같이 실험결과 및 역해석에 의한 구성관계식으로 산정된 체적압축계수는 유효응력과의 양대수축적에서 선형적으로 평가되었다. 체적압축계수는 높은 응력에서는 표준압밀실험, 중간 응력에서는 표준압밀 및 CRS압밀 실험, 낮은 응력에서는 구성관계 분석결과가 유효응력과의 관계를 나타내고 있다. 그러므로 체적압축계수,  $m_v$ 는 유효응력  $0.01 \text{ kgf/cm}^2$ 일 때,  $m_v = 15.0 \text{ cm}^2/\text{kgf}$ 와  $p' = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ 일

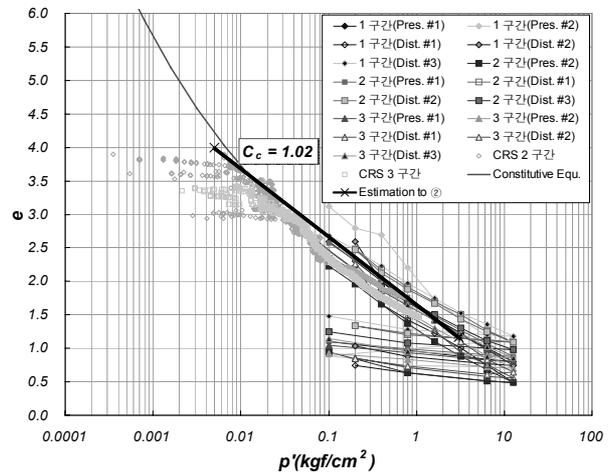


그림 12. 압축지수 제안 2

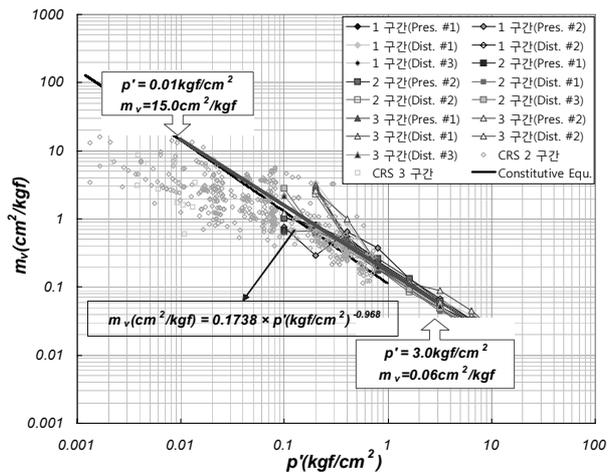


그림 13. 체적압축계수 제안

때,  $m_v=0.06\text{cm}^2/\text{kgf}$ 를 양대수상에서 선형으로 연결하여 그림 13 및 아래 식 (4)과 같이 나타내었다.

$$m_v = 0.1738 \times p' - 0.968 \quad (4)$$

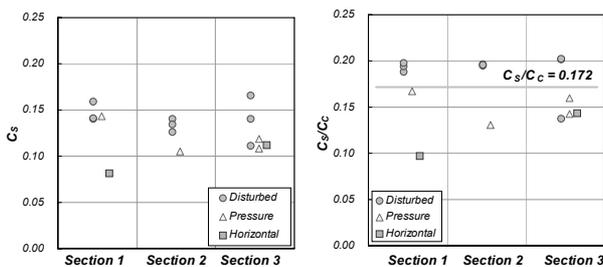
여기서,  $m_v$  : 체적압축계수( $\text{cm}^2/\text{kgf}$ )  
 $p'$  : 연직유효응력( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

### 6.3 재압축지수

1차원 압밀이론의 적용에서는 일반적으로 재압축지수,  $c_r$ 와 팽창지수,  $c_s$ 가 동일하게 적용한다. 본 연구에서도 표준압밀시험의 Unloading단계에서 산정된 팽창지수로부터 재압축지수를 평가하였다. 그림 14(a)는 표준압밀시험으로 구한 구간별로 팽창지수이며, (b)는 팽창지수를 압축지수로 나눈  $c_s/c_c$ 이다. 그림과 같이 팽창지수는 교란시료의 표준압밀시험(Disturbed)과 강제압밀시료의 표준압밀시험(Pressure), 수평압밀에 대한 표준압밀시험(Horizontal)에서 분산이 큰 일부 결과를 제외하면 평균 0.135로 나타났다. 특히, 팽창지수/압축지수비는 불교란시료 및 교란시료에서 일관성있게 나타났으므로  $c_r$ 의 평가를 팽창지수/압축지수 비인  $c_s$  ( $\approx c_r$ )/ $c_c=0.172$ 로 제안할 수 있을 것이다.

### 6.4 연직압밀계수

연직방향의 압밀계수  $c_v$ 는 표준압밀시험과 CRS압밀시험 결과를 분석하여 그림 15와 같이 평가하였다. 그림 15에서 보는 바와 같이 연직압밀계수의 분산은 비교적 크게 나타났으며, 특히 CRS압밀시험의 분산은 매우 크게 측정되었다. 이는 CRS시험의 특징상 직접적으로 획득되는 간극수압 및 침하량의 작은 차이에서도 유도된 압밀계수가 크게 변화하는 경향 때문으로 판단된다. 그러므로 CRS의 결과는 전체적인 연직압밀계수의 범위를 파악하는데에만 적용하였다. 연직배수재의 산정을 위해서 다양한 조건으로 수행한 표준압밀시험 결과로부터 평균값과 최빈값을 분석하여 연직압밀계수를 제안하였다. 연직압밀계수는 유효응력



(a) 팽창지수 (b) 팽창지수/압축지수 비

그림 14. 구간별 시료조건에 따른 팽창지수

$\sigma'=0.01, 0.2, 3.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 에서  $c_v=6.0, 2.0, 4.0 \times 10^{-4}\text{cm}^2/\text{sec}$ 로 나타났으며, 식 (5)와 같이 유효응력을 독립변수로 하는 지수형 직선식으로 연직압밀계수를 제안하였다.

$$p' = 0.01 \sim 0.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2 : c_v = 1.1 \times 10^{-4} \times p'^{-0.37}$$

$$p' = 0.2 \sim 3.0 \text{ kgf}/\text{cm}^2 : c_v = 3.0 \times 10^{-4} \times p'^{0.26} \quad (5)$$

여기서,  $c_v$  : 연직압밀계수( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )  
 $p'$  : 연직유효응력( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

### 6.5 연직투수계수

연직투수계수는 그림 16과 같이 유효응력과 양대수상에서 선형적으로 나타나며, 실험결과와 구성관계식을 이용하여 산정할 수 있다. 현장조건에서 예상되는 설계하중 범위를 감안하여  $\sigma'=0.01$ 과  $3.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 유효응력에서 투수계수,  $k=3 \times 10^{-6}$ 과  $3 \times 10^{-8}\text{cm}/\text{sec}$ 을 연결하는 양대수축상 선형관계으로 식 (6)과 같이 제안하였다.

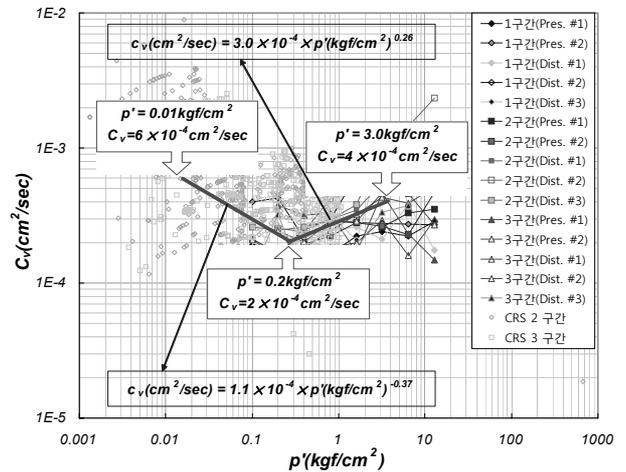


그림 15. 연직압밀계수 제안

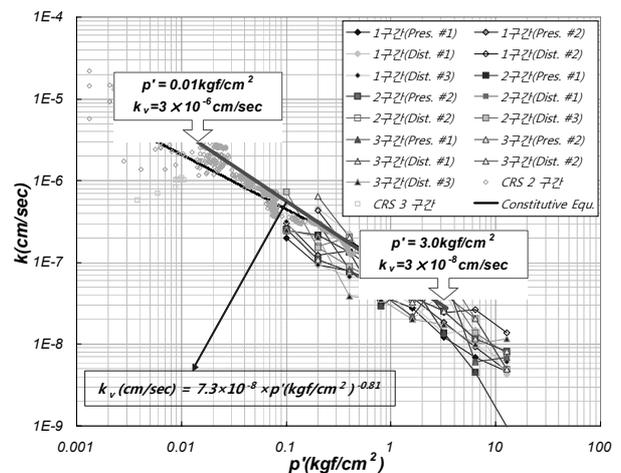


그림 16. 연직투수계수 제안

$$k_v = 7.3 \times 10^{-8} \times p'^{-0.81} \quad (6)$$

여기서,  $k_v$  : 연직투수계수(cm/sec)  
 $p'$  : 연직유효응력(kgf/cm<sup>2</sup>)

## 6.6 수평압밀계수

수평압밀계수,  $c_h$ 는 수평방향의 압밀특성을 평가하기 위해 수행한 직경 60, 100, 150mm의 Rowe Cell 압밀실험 결과를 이용하여 분석하였다. 분석결과, 그림 17에서 보는 바와 같이 수평압밀계수,  $c_h$ 는 유효응력 0.01, 0.2, 3.0kgf/cm<sup>2</sup>에서 각각  $7.2 \times 10^{-4}$ ,  $2.4 \times 10^{-4}$ ,  $4.8 \times 10^{-4}$ cm<sup>2</sup>/sec의 값으로 나타났으며, 유효응력 2kgf/cm<sup>2</sup>에 전후로 지수형 직선식을 식 (7)과 같이 획득할 수 있었다.

$$p' = 0.01 \sim 0.2 \text{ kgf/cm}^2 : c_h = 1.3 \times 10^{-4} \times p'^{-0.37}$$

$$p' = 0.2 \sim 3.0 \text{ kgf/cm}^2 : c_h = 3.6 \times 10^{-4} \times p'^{0.26} \quad (7)$$

여기서,  $c_h$  : 수평압밀계수(cm<sup>2</sup>/sec)  
 $p'$  : 연직유효응력(kgf/cm<sup>2</sup>)

Rowe-cell압밀실험과 동일한 강제압밀시료로 수행한 표준압밀실험의 연직압밀계수와 비교한 결과,  $c_h/c_v$ 는 1.13~1.65로 나타났으며, 일반적인 하중범위를 3.0kgf/cm<sup>2</sup>으로 할 경우 이 하중이내에서는  $c_h/c_v$  평균값이 1.26으로 분석되었다. 이와 같이 수평방향 압밀계수가 연직방향에 비해 26% 가량 크게 나타나는 것으로 볼 때, 완전 교란된 시료가 강제압밀 과정을 통해 미소하게나마 입자 재배열이 나타나고 있다고 판단되었다. 현장의 응력조건으로 강제압밀하여 수행한 압밀실험의 이러한 결과로 볼 때, 준설토 투기후 약 30개월 경과한 현장조건에서 매립토 압밀특성의 이방성이 점차 발현될 가능성을 생각해 볼 수 있을 것이다. 준

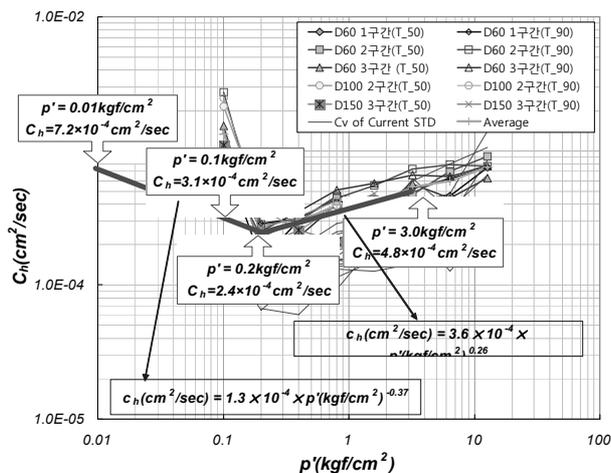


그림 17. 수평압밀계수 제안

선택매립토에서 압밀 및 전단특성 등의 이방성이 발현되는 시기에 대한 다양하게 연구가 수행될 때 보다 합리적인 결론이 제안될 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 높은 함수비로 인해 불교란 시료를 채취할 수 없는 기 매립된 준설토 기반에서의 압밀특성 파악과 압밀정수 평가를 위해 교란시료로 실내실험을 수행하여 분석하는 방법에 대해 연구하였다. 이를 위해 전라남도 00매립지의 교란시료를 채취하여 다양한 압밀실험과 원심모형실험을 수행하였으며, 유한변형을 압밀이론에 의한 해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 표준압밀실험 결과, 완전교란된 시료의 압축지수는 0.64~0.83 평균 0.74로 강제압밀 시료의 압축지수 0.75~0.83 평균 0.80에 비하여 다소 작은 값을 보였다. 간극비-유효응력의 관계는 표준압밀실험에서 선형적인 경향을 나타내었으나 일정변형을 압밀실험에서는 비선형적인 경향으로 나타났다.
- (2) 수평압밀계수를 구하기 위하여 교란시료를 현장의 평균 유효응력조건으로 압밀한 강제압밀 시료에 대하여 직경 60, 100, 150mm의 Rowe-cell압밀실험을 수행하였다. 그 결과, 0.2kgf/cm<sup>2</sup>의 하중조건에서  $c_h=1.5\sim 3.8 \times 10^{-4}$ cm<sup>2</sup>/sec로 가장 작은 값이 유도되었으며, 이후 하중이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 원심모형기를 이용하여 자중압밀실험을 실시하여 시간-침하 관계를 획득하였으며, 자중압밀에 의한 최종침하량을 획득하기 위하여 침하예측기법인 쌍곡선법과  $\sqrt{t}$ 법, Asaoka법으로 분석하였다. 그 결과, Asaoka법으로 예측한 시간-침하관계가 실험결과와 가장 유사하게 산정되었다. 자중압밀실험결과로부터 간극비-유효응력-투수계수의 구성관계를 유한변형을 압밀이론으로 역해석할 때 Asaoka법에 의한 최종침하량을 적용하였다.
- (4) 각종 실험결과와 구성관계로부터 미소변형을 압밀해석에 요구되는 압축지수, 팽창지수, 연직 및 수평압밀계수 등을 분석하여 기 매립된 준설토 기반에 적용할 수 있는 압밀정수를 제안할 수 있었다. 압축지수는 전체적인 평균값과 자중압밀종료시의 최종간극비를 기준으로 두 개의 값을 제안하기도 하였다.
- (5) 압밀실험과 구성관계를 분석한 결과, 체적변화계수와 연직투수계수는 유효응력과 양대수축상에서 선형관계로 나타났다. 그러므로 이를 분석되어 유효응력을 독

립변수로 하는  $m_v$ 와  $k_v$ 의 지수식을 제안하였다.

- (6) 표준압밀시험과 CRS압밀시험에 의한 연직압밀계수,  $c_v$ 와 Rowe-cell압밀시험에 의한 수평압밀계수,  $c_h$ 를 분석한 결과 전반적으로  $0.2\text{kgf/cm}^2$ 의 하중조건에서 가장 작은 값을 보였다. 그러므로  $p'$ 과  $c_v$ ,  $c_h$ 의 관계를  $0.2\text{kgf/cm}^2$ 의 하중을 기준으로 양대수축상 각각 2개의 직선식으로 유도하였다. 또한, 강제압밀된 시료의 수평압밀계수가 강제압밀시료의 연직압밀계수에 비해 1.26배 가량 크게 나타나 일정한 시간동안의 압밀진행으로 인한 이방성의 발현 가능성을 확인할 수 있었다.

위의 연구를 통하여 고함수비로 형성되어 있어 불교란 시료 채취가 어려운 매립지 준설토의 압밀특성을 평가하는 방법을 고찰하였다. 본 연구에서 제안한 정량적인 값은 실험을 수행한 전라남도 00매립지에 국한하여 적용가능한 결과이다. 그러나 이 논문에서 제시한 과정으로 기 매립된 준설토 교란시료로 실험을 수행 분석하면, 합리적인 압밀정수를 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 유남재, 김근수 (2000), 고함수비 준설매립토의 구성관계 획득을 위한 원심모형실험, *대한토목학회논문집*, Vol. 20, No.

- 7, pp. 71~74.
2. 유남재, 박병수, 김근수 (2002), 고함수비 준설매립토의 구성관계획득을 위한 역해석기법, *대한토목학회논문집*, Vol. 22, No. 1-C, pp. 21~31.
3. 이정기 (1999), *현장계측치를 이용한 점성토 지반의 침하 예측 비교 분석*, 석사학위논문, 단국대학교, pp. 3~21.
4. 이종호 (2000), *준설매립지반의 압밀거동에 관한 수치해석 및 실험적 연구*, 박사학위논문, 강원대학교, pp. 14~83.
5. 전진용 (2008), *저중압밀지반에 대한 침하예측기법의 적용성*, 석사학위논문, 강원대학교, pp. 6~17.
6. 한국지반공학회 (2005), *개정판 지반공학시리즈 10 준설매립*, 구미서관, 서울, pp. 12~28.
7. Gibson, R. E., England, G. L. and Hussay, M. J. L. (1967), The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clay I: Finite Non-linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers, *Geotechnique*, Vol. 17, No. 3, pp. 261~273.
8. Hansbo, S. (1981), Consolidation of Fine grained Soils by Prefabricated Drains, *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 677~682.
9. Head, K. H. (1986), *Manual of Soil Laboratory Testing - Volume 3 Effective Stress Tests*, ELE, London, pp. 1129~1225.
10. Schiffman, R. L. (1984), *One-Dimensional Consolidation of Saturated Clay Layers Nonlinear Finite Strain Primary Consolidation*, Press of University of Colorado, Boulder, pp. 1-1~4-11.
11. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, New York, pp. 265~296.
12. Yong, R. N. (1984), Particle Interaction and Stability of Suspended Solids, *ASCE, Special Publication on Sedimentation/Consolidation Models*, pp. 35~38.

(접수일: 2008. 5. 2 심사일: 2008. 5. 28 심사완료일: 2008. 8. 27)